

PRODUCTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS:

EVALUACIÓN DEL IMPACTO
AMBIENTAL Y PRÁCTICAS
SOSTENIBLES



ARCO
EDITORES

Autores

**REYNALDO MELQUIADES REYES ROQUE
KELLY MADELEYNE SÁENZ JAMANCA
VILMA MONTEAGUDO ZAMORA**

PRODUCTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO
AMBIENTAL Y PRÁCTICAS
SOSTENIBLES**



ARCO
EDITORES ● ● ●

Autores

**REYNALDO MELQUIADES REYES ROQUE
KELLY MADELEYNE SÁENZ JAMANCA
VILMA MONTEAGUDO ZAMORA**

Editor Chefe

Ivanio Folmer

Bibliotecária

Eliane de Freitas Leite

Revisora Técnica

Gabriella Eldereti Machado

Diagramação e Projeto Gráfico

Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa

www.canva.com

Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí

Profa. Dra. Alicia Eugenia Olmos - Universidad Católica de Córdoba

Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - Instituto Federal Farroupilha

Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - Universidade de Santa Cruz do Sul

Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - Universidade Cidade de São Paulo

Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - Universidade Federal do Ceará

Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - Faculdade Sesi-Sp de Educação

Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - Universidade Franciscana

Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - Universidade Católica de Brasília

Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - Universidade Federal de Santa Maria

Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - Universidade Federal de Santa Maria

Profa. Dra. Marcela Mary José da Silva - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - Universidade Federal do ABC

Prof. Dr. Roberto Araújo Silva - Centro Universitário Lusíada

Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - Universidade Central “Marta Abreu” de Las Villas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Reyes Roque, Reynaldo Melquiades
Productos Químicos en la Estabilización de Suelos
[livro eletrônico] : Evaluación del Impacto Ambiental
y Prácticas Sostenibles / Reynaldo Melquiades Reyes
Roque, Kelly Madeleyne Sáenz Jamanca, Vilma
Monteagudo Zamora. -- Santa Maria, RS : Arco
Editores, 2023.

PDF

Bibliografia.

ISBN 978-65-5417-149-6

1. Impacto ambiental 2. Inovações tecnológicas
3. Produtos químicos 4. Solos - Análise
5. Sustentabilidade ambiental I. Sáenz Jamanca, Kelly
Madeleyne. II. Monteagudo Zamora, Vilma. III. Título.

23-173828

CDD-631.4

Índices para catálogo sistemático:

1. Ciência dos solos 631.4

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415



10.48209/978-65-5417-149-6

Este livro é o resultado de uma pesquisa científica.

Antes de ser publicado, ele foi revisado por pares acadêmicos externos.



ARCO EDITORES

Telefone: 5599723-4952

contato@arcoeditores.com

www.arcoeditores.com

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I.....	14
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	14
1.1. Introducción a la estabilización de suelos.....	15
1.2. Propiedades y características de los suelos.....	16
1.2.1. Composición y estructura del suelo.....	18
1.3. Problemas asociados a suelos inestables.....	19
1.3.1. Erosión y pérdida de suelo.....	19
1.3.2. Asentamientos diferenciales.....	20
1.3.3. Inestabilidad en pendientes y taludes.....	21
1.4. Métodos de estabilización de suelos.....	22
1.4.1. Compactación del suelo.....	23
1.4.2. Adición de materiales estabilizantes.....	24
1.4.3. Uso de geosintéticos y geotextiles.....	25
CAPÍTULO II.....	27
PRODUCTOS QUÍMICOS.....	27
2.1. Introducción a los productos químicos.....	28
2.2. Clasificación de los productos químicos.....	29
2.2.1. Productos químicos naturales vs. sintéticos.....	30
2.2.2. Productos químicos orgánicos vs. inorgánicos.....	30
2.2.3. Productos químicos tóxicos vs. no tóxicos.....	32

2.3. Uso de productos químicos en diferentes sectores.....	33
2.3.1. Industria química y manufacturera.....	33
2.3.2. Agricultura y pesticidas.....	34
2.3.3. Medicina y productos farmacéuticos.....	35
2.4. Impacto ambiental de los productos químicos.....	36
CAPÍTULO III.....	39
IMPACTO AMBIENTAL DE PRODUCTOS QUÍMICOS.....	39
3.1. Definición y conceptos básicos.....	40
3.2. Contaminación del aire por productos químicos.....	43
3.2.1. Emisiones de compuestos químicos tóxicos.....	45
3.3. Contaminación del agua por productos químicos.....	46
3.3.1. Vertidos industriales y residenciales.....	48
3.4. Contaminación del suelo por productos químicos.....	49
CAPÍTULO IV.....	51
INCIDENCIA DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EN LA CARRETERA NO PAVIMENTADA EN ÁNCASH.....	51
CAPÍTULO V.....	101
USO DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE...	101
5.1. Innovaciones en productos químicos más seguros y sostenibles.....	102
5.2. Innovaciones y avances tecnológicos en la estabilización de suelos.....	103
5.3. Nuevos enfoques sostenibles: economía circular y química verde.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	54
Tabla 2. Ensayos Estándar de laboratorio para el material de afirmado existente acumulado por cada 5.175 km de superficie de rodadura.....	62
Tabla 3. Ensayos Especiales de laboratorio para el material de afirmado existente acumulado por cada 5.175 km de superficie de rodadura.....	62
Tabla 4. Ensayos Estándar de laboratorio para las muestras representativas de la cantera de suelo N°01.....	63
Tabla 5. Ensayos Especiales de laboratorio para las muestras representativas de la cantera de suelo N°01.....	63
Tabla 6. Ensayos de laboratorio para muestras de suelo estabilizado con productos químicos.....	64
Tabla 7. Dosificaciones para las alternativas de suelo estabilizado con productos químicos.....	66
Tabla 8. Resultados de los ensayos de laboratorio de la plataforma existente.....	70
Tabla 9. Resultado del CBR por cada 5.175 km de superficie de rodadura.....	71
Tabla 10. Datos de la estación de conteo vehicular.....	71
Tabla 11. Resultado volumen vehicular diario anual.....	72
Tabla 12. Resultado volumen vehicular proyectado para un periodo de diseño de diez años.....	73
Tabla 13. Cargas por eje de vehículos pesados en afirmados.....	73
Tabla 14. Cargas por Eje para determinar $EE_{8.2tn}$ en afirmados.....	74
Tabla 15. Ejes Equivalentes por día para el carril de diseño.....	74
Tabla 16. Resultado número repeticiones de EE de 8.2 tn para un periodo de diseño de diez años.....	75

Tabla 17. Ubicación de la cantera de suelo N°01.....	76
Tabla 18. Resultados de los ensayos de laboratorio de la cantera de suelo N°01.....	78
Tabla 19. Comparación de los requisitos de calidad para afirmados con las características de la cantera N.º 01.....	79
Tabla 20. Verificación de la correcta aplicación de productos químicos como Soluciones Básicas.....	79
Tabla 21. Verificación del cumplimiento de los requisitos generales del MTC para suelos estabilizados con productos químicos.....	80
Tabla 22. Verificación y cumplimiento de las consideraciones de uso del producto químico Proes10.....	81
Tabla 23. Verificación de parámetros máximos y mínimos del suelo estabilizado con el producto químico Proes100.....	82
Tabla 24. Verificación y cumplimiento de las consideraciones de uso del producto químico Megasoil.....	83
Tabla 25. Verificación de parámetros máximos y mínimos del suelo estabilizado con el producto Megasoil.....	84
Tabla 26. Verificación y cumplimiento de las consideraciones de uso del producto químico PolyCom.....	85
Tabla 27. Verificación de parámetros máximos y mínimos del suelo estabilizado con el producto químico PolyCom.....	87
Tabla 28. Comparación de las especificaciones técnicas de suelos estabilizados con productos químicos y las consideraciones de uso de los fabricantes.....	88
Tabla 29. Comparación técnica del procedimiento constructivo de la estabilización de suelos con productos químicos en la carretera.....	89
Tabla 30. Comparación de la influencia técnica de la estabilización de suelos con los productos químicos.....	90
Tabla 31. Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos Proes100.....	92
Tabla 32. Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos Megasoil.....	93
Tabla 33. Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos PolyCom.....	94
Tabla 34. Comparación de la influencia económica de la estabilización de suelos con los productos químicos.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.....	57
Figura 2. Curva Dosificación vs. CBR del suelo estabilizado con el producto químico Proes100.....	81
Figura 3. Curva Dosificación vs. CBR del suelo estabilizado con el producto químico Megasoil.....	84
Figura 4. Curva Dosificación vs. CBR del suelo estabilizado con el producto químico PolyCom.....	86

RESUMEN

Los productos químicos poseen una enorme importancia en el mundo porque, gracias a sus propiedades, permiten realizar diversas actividades, tales como la limpieza del hogar, la fumigación en la agricultura, la construcción de edificios, casas o carreteras. En este aspecto, es un recurso útil para la mejora de la sociedad; sin embargo, también es un elemento que puede ocasionar daño al medioambiente debido a los componentes que posee, los cuales afectan y contaminan el aire, suelo y agua, y la salud de todo ser vivo, motivo por el cual se han estado creado alternativas para evitar daños colaterales durante su uso. Este libro se estructura en cinco capítulos; en cada uno de estos se presenta un tema en particular y la investigación propiamente dicha. Los temas que se desarrollan son la estabilización de los suelos, los productos químicos, el impacto ambiental de los productos químicos y la sostenibilidad. Respecto a la investigación, se propone por objetivo determinar la incidencia de los productos químicos PolyCom, Megasoil y Proes100 en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa, Bolognesi. Los resultados muestran que el Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³, el PolyCom 0.030 g/kg y el Megasoil 0.030 g/kg de material incrementan el CBR del suelo natural. Se concluye que los tres productos químicos inciden en el CBR del suelo natural porque lo incrementan en 59.25 % y reducen la expansión en 100 %.

Palabras clave: productos químicos, estabilización de suelos, sostenibilidad, impacto ambiental, contaminación ambiental

ABSTRACT

Chemical products are of great importance in the world because, due to their properties, they allow us to carry out various activities, such as household cleaning, fumigation in agriculture, construction of buildings, houses or roads. In this aspect, it is a useful resource for the improvement of the country; however, it is also an element capable of causing damage to the environment due to its components, which affect and contaminate the air, soil and water, and the health of all living beings; for this reason, alternatives have been created to avoid collateral damage during its use. This book is structured in five chapters; each chapter presents a particular topic and the research itself. The topics developed are soil stabilization, chemicals, environmental impact of chemicals and sustainability. Regarding the research, the objective is to determine the incidence of the chemical products PolyCom, Megasoil and Proes100, and soil stabilization on the unpaved road Chasquitambo-Llampa, Bolognesi. The results show that Proes 0.27 l/m³ + Portland cement 40 kg/m³, PolyCom 0.030 g/kg and Megasoil 0.030 g/kg of material increase the CBR of the natural soil. It is concluded that the three chemicals affect the CBR of the natural soil because they increase it by 59.25% and reduce the expansion by 100%.

Keywords: chemicals, soil stabilization, sustainability, environmental impact, environmental contamination

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de los suelos es uno de los problemas que más se presentan en para las carreteras no pavimentadas, puesto que la superficie de rodadura es afectada por deformaciones (baches), encalaminados, ahuellamientos, erosiones, emisión de polvo, entre otros; todos estos factores ocasionan el rápido deterioro de la vía, lo que se traduce en el aumento de los costos de construcción, además del tiempo y los sobrepagos para los usuarios, quienes deben tomar vías alternativas para llegar a su destino; por tanto, la estabilización de los suelos se convierte en un reto para el Estado y para las empresas que tienen a su cargo esta labor, en vista de que deben garantizar que para las próximas construcciones de vías que se realicen sean duraderas para que no afecte el día a día de los usuarios.

Si bien existen diversos productos químicos utilizados para la estabilización de los suelos, no siempre se usan los más aptos para cada vía por la falta de información en cuanto a la zona o el clima, la cercanía del mar, la humedad, entre otros aspectos de la naturaleza, los cuales inciden en la duración de la carretera y causan su erosión. Debido a esto surge la necesidad de que en los proyectos para la construcción de carreteras se realice un análisis pormenorizado del lugar a fin de evitar futuros estragos que solo ocasionan malestar en la población; asimismo, se requiere buscar estabilizadores que sean compatibles con el tipo de suelo predominantes para mejorar el nivel de servicio y la vida útil de las carreteras a nivel nacional.

El análisis del área y la búsqueda de productos para construir la carretera son factores indispensables para garantizar un buen producto vial. Así también, la aplicación de productos químicos que no atenten contra la sostenibilidad am-

biental es otro punto importante a considerarse durante el proyecto, puesto que dichos productos han causado, con el transcurso del tiempo, la degradación y desertificación del suelo, la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono, la destrucción de las especies marinas, entre otros problemas de escala mundial. Ante esta problemática, la estabilización de los suelos es una labor que requiere gran dedicación no solo para garantizar la vida útil de la vía, sino también para evitar más daño ambiental y a todos los seres vivos que componen el planeta.

CAPÍTULO I

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de los suelos es uno de los principales problemas que se presentan en el país, lo cual se observa en la cantidad de carreteras no aptas para soportar el peso de los vehículos, como consecuencia de no haber sido elaboradas considerando las particularidades de la zona o por no aplicar el producto adecuado durante la construcción. Para solucionar este problema, es preciso disponer de un equipo capacitado para realizar un análisis detallado del lugar y sugerir la aplicación de técnicas y herramientas con las cuales se evite la inestabilidad del suelo; así como para que exijan determinados productos químicos estabilizadores que aseguren un mejor comportamiento del suelo, los cuales se encuentran en gran cantidad en el mercado, debido a la variedad de empresas dedicadas a la producción de producto químicos.

Con la aplicación de los productos químicos estabilizadores se puede garantizar un mejor nivel del servicio de la superficie de rodadura de las carreteras no pavimentadas, las cuales sufren un deterioro rápido por los efectos del clima y el tránsito, tales como la formación de baches o el desprendimiento de agregado, que ocasionan que las capas construidas sean afectadas y destruidas, lo que impide el tránsito vehicular durante cualquier época del año. Aunque en diversas ocasiones las carreteras no han tenido una duración prolongada debido al uso inadecuado de los productos químicos o al inapropiado estudio del área, estos factores han provocado diversos problemas, tales como la contaminación de las fuentes de agua o las plantas, solicitudes continuas de conservación, de-

terio de los bienes privados y públicos, disminución de la seguridad vial e incremento de los costos de operación.

Por tanto, para evitar este tipo de situaciones, principalmente, el costo económico elevado por construir nuevamente o el malestar en los usuarios por tener que desviarse de sus rutas, se requiere implementar políticas o medidas empresariales para mejorar de manera gradual estos caminos, por ejemplo, la estabilización química, que se considera una opción factible y económica en muchos países del mundo por los buenos resultados que ofrece y la facilidad con la que puede aplicarse.

1.1. Introducción a la estabilización de suelos

La estabilización de los suelos es un proceso al que los suelos naturales son sometidos para mejorar sus cualidades, por ejemplo, aumentar su estabilidad, reducir su plasticidad, incrementar su resistencia, entre otros. Es el mejoramiento de las propiedades del suelo mediante la aplicación de procesos mecánicos y productos naturales, sintéticos y químicos; estos procesos son utilizados, principalmente, en suelos de subrasante pobre o inadecuado, o en suelos arcillosos, porque no cumplen con los requerimientos para asegurar la estabilidad del pavimento, como consecuencia de su baja resistencia al corte, alto índice de plasticidad y deformaciones (Linares *et al.*, 2020).

La estabilización que más suele emplearse es la química, ya que se puede manejar en la mayoría de los tipos de suelos existentes. Con la estabilización química, se mejoran las propiedades geotécnicas, lo que ocasiona la alteración de las propiedades químicas y físicas del suelo y, por ende, la mitigación de los problemas de la superficie terrestre, tales como el incremento de sus propiedades (durabilidad y resistencia) y la inestabilidad volumétrica (Rivera *et al.*, 2020). Debido a los beneficios de la estabilización química, esta se ha perfilado como una solución interesante, pues es una opción que permite aprovechar

las condiciones iniciales del terreno para aumentar su capacidad portante y su densificación, con el fin de volver al suelo apto para garantizar un pavimento estable.

Actualmente, se están desarrollando nuevas tecnologías para modificar las propiedades del suelo y volverlo apto para la pavimentación. Estas tecnologías se enfocan en los procesos de estabilización químicos, por ejemplo, suelo-asfalto, suelo-cemento, suelo-cal, estabilización con polímeros, estabilización con sales, compuestos resinosos, entre otros, los cuales son aplicados con el propósito de agregar diversos elementos químicos para modificar el suelo (Jácome-Macías y Ortiz-Hernández, 2022). De este modo, se pretende que los suelos tengan las características necesarias para ser pavimentadas, pues, en muchas ocasiones, un suelo inadecuado ocasiona problemas durante la obra civil, al presentar grietas o deformaciones durante su construcción o con el paso del tiempo por la falta de resistencia del suelo. Para evitar este tipo de situaciones, se aplican procedimientos que estabilizan el suelo, evitando mayores consecuencias y brindando una solución permanente a los suelos, por ejemplo, que no se originen fisuras durante el uso del pavimento.

1.2. Propiedades y características de los suelos

El suelo es una estructura compleja que se expande por todo el planeta. Es una capa delgada formada a partir de la desintegración de las rocas a causa del viento, los cambios de temperatura y la acción del agua. Se caracteriza por estar constituido por materia orgánica, agua, minerales, vegetales y aire, y por ser el escenario de diversos procesos físicos y químicos. Así también, se caracteriza por tener dos tipos de propiedades, las cuales se explican a continuación:

Propiedades físicas del suelo

Zambrano *et al.* (2023) indican que las propiedades físicas del suelo son las siguientes:

- **Textura:** es aquella propiedad que afecta de forma directa a la retención y la fertilidad del agua, el drenaje, la aireación, entre otras propiedades. Presenta diferentes tamaños y formas, pues si es arenoso, la textura es gruesa y tiene poca capacidad para retener nutrimentos y agua; en cambio, si es arcilloso, la textura es fina y tiene una alta capacidad para retener nutrimentos y agua.

- **Consistencia:** depende del contenido de humedad y puede ser blanda, dura o muy dura. Para identificar la consistencia del suelo, se mide el nivel de humedad; con esta información se conoce si el suelo es apto para resistir fracturas o deformaciones y, por ende, para construir.

- **Densidad:** es el peso del suelo por el volumen. La densidad del suelo se divide en dos tipos: aparente y real. Respecto al primero, es el peso seco del suelo por la unidad del volumen del suelo inalterado; en el segundo tipo de densidad, se depende de los elementos que componen el suelo.

- **Color:** se relaciona con las propiedades que el suelo contenga y, usualmente, el cambio de color se debe al nivel de oxidación del agua.

- **Porosidad:** es la cantidad de poros que hay entre las partículas sólidas inorgánicas u orgánicas del suelo.

Propiedades químicas del suelo

Fertilab (s/f) señala que las propiedades químicas del suelo son las siguientes:

- **Capacidad de intercambio catiónica (CIC):** es una propiedad que determina la cantidad y la disponibilidad de nutrientes para los suelos arenosos y las plantas.

- **Conductividad eléctrica (CE):** conduce la corriente eléctrica y depende del contenido de las sales ionizadas o disueltas en la solución del suelo. Un adecuado nivel de CE en sustratos es 1 a 2 dS/m.

- **pH:** es la capacidad del suelo para absorber iones. Esta propiedad determina la movilidad, disponibilidad, absorción y solubilidad de los nutrimentos para las plantas.

1.2.1. Composición y estructura del suelo

La suelo está compuesto por cuatro elementos: agua (25 %), aire (25 %), materia orgánica (5 %) e inorgánica (40-50 %) (Zita, 2021). Dentro de estos compuestos, la materia orgánica es la que tiene una mayor importancia porque imparte al suelo efectos en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, lo cual se traduce en el incremento de la capacidad productivas; es decir, un suelo con un nivel alto de materia orgánica garantiza un mayor rendimiento del suelo para cultivos (Hernández *et al.*, 2021). El agua se infiltra en el suelo, el cual se evapora o se utiliza para las plantas; es un parte esencial del suelo porque contienen sales disueltas y otros productos químicos que brindan los nutrientes necesarios para garantizar el crecimiento de las plantas.

La aire también forma parte del suelo, y se presenta por la estructura porosa, la cual brinda espacio para que el aire entre; es un componente necesario para las raíces y para otros microorganismos que viven en la corteza terrestre. La materia inorgánica se encuentra en minerales, sales, agua y dióxido de carbono; se caracteriza por no presentar metabolismo ni funciones fisiológicas, y es de gran importancia para el suelo porque una de sus funciones es garantizar su fertilidad.

En cuanto a la estructura del suelo, este se subdivide en cuatro capas u horizontes. Vargas-Rodríguez *et al.* (2020) sostienen que el suelo cuenta con dos horizontes orgánicos y cinco horizontes minerales. El horizonte orgánico se subdivide en horizonte H y O. El primero está constituido por la acumulación de materiales inorgánicos y agua, y se encuentra en suelos pantanosos; el segundo está compuesto por la acumulación de material orgánico y no está saturado por agua; es común en suelos forestales.

El horizonte mineral se subdivide en horizontes A, E, B, C y R. El primero está constituido por la acumulación de material orgánico, tiene un menor contenido de arcilla y su color es más negruzco. El segundo se caracteriza por

tener poca cantidad de arcilla, aluminio, hierro o la combinación de estos, y por presentar colores más claros. El tercero incluye una concentración de hierro, arcilla o aluminio; además, presenta una mejor estructura edáfica y colores más fuertes. El cuarto es poco afectado por los procesos edafogenéticos y el quinto se caracteriza por tener una estructura dura y cementada.

1.3. Problemas asociados a suelos inestables

La inestabilidad del suelo se debe a diversos problemas, como la erosión, los asentamientos diferenciales y la inestabilidad de los taludes y pendientes. Para comprender cada uno de estos problemas, a continuación, se describen con mayor detalle.

1.3.1. Erosión y pérdida de suelo

La erosión del suelo es un proceso que se produce en la superficie terrestre y causa el desprendimiento y transporte de las partículas; surge como consecuencia de la deforestación, uso de pesticidas y fertilizantes, y quemas, las cuales ocasionan que el suelo pierda su fertilidad y profundidad (Bejarano, 2022). Es uno de los principales problemas ambientales en el mundo y el factor principal que ocasiona la degradación del suelo, lo que se refleja en importantes pérdidas económicas como producto de que el suelo no tiene los suficientes componentes para garantizar el potencial productivo.

La erosión es multifactorial. Los factores que más influyen en este problema mundial son los efectos del cambio climático, los cuales incrementan la temperatura del aire y ocasionan que los patrones de precipitación sean impredecibles; la erosividad de la lluvia también es otro factor que eleva la tasa de pérdida en el suelo a nivel mundial (Muñoz *et al.*, 2023); los incendios forestales generan un déficit de árboles en los bosques, pese a que las plantas son necesarias para detener la escorrentía del agua; o las ráfagas de viento, que

remueven las partículas de la tierra seca, lo que se traduce en la futura desertificación del suelo.

Ante esta realidad, es preciso que la humanidad sea concientizada sobre los problemas que ocasionan ciertos productos en la naturaleza y en el desarrollo del cambio climático; así también, es necesario que se brinde información sobre las medidas que pueden aplicarse para detener la erosión del suelo, por ejemplo, la plantación de árboles y la restricción de la tala, así como reducción del uso de productos químicos. Con estas medidas preventivas se garantiza un suelo fértil y se evita su deterioro, además de prevenir la reducción de cultivos por un mal uso de la tierra, la elevación de la tasa de pobreza y la calidad de vida.

1.3.2. Asentamientos diferenciales

Un asentamiento diferencial es el desplazamiento o movimiento ocasionado entre dos puntos de una cimentación. Es un efecto de una construcción inadecuada. Se presenta cuando hay asentamientos diferentes establecidos en un punto a otro de la cimentación, una distribución de esfuerzos y un cambio de magnitud. La diferencia de asentamiento se genera por la variedad del subsuelo o por una modificación importante en la carga, la cual puede ocasionar inestabilidad en la cimentación (Bravo, 2019).

En otros términos, se aplica para hacer alusión a la desigualdad que los cimientos de una estructura presentan cuando se asientan. Todas las estructuras tienen asentamiento de algún tipo sin excepción, pero al momento de construir se procura mitigarlos para evitar que a largo plazo de presenten fallas que puedan ocasionar el colapso de toda la edificación. Comúnmente, el término asentamiento diferencial también se atribuye a las prácticas inadecuadas aplicadas durante el proceso constructivo; no obstante, la causas principales que ocasionan este tipo de asentamiento son la previa evaluación y la preparación del

terreno que en muchos casos no es la apropiada, puesto que el comportamiento del suelo durante o después de construir varía por desplazamiento, consolidación, retracción por secamiento, expansión, entre otros, como consecuencia de un drenaje deficiente, las inundaciones, las vibraciones por construcciones cercanas, las raíces de los árboles, entre otros (Muñoz y Morales, 2022).

Para evitar este tipo de situaciones y prevenir el derrumbe de la edificación, es fundamental evaluar el suelo y considerar los posibles factores que pueden modificar su composición. Asimismo, un profesional experto en el tema debe evaluar con gran rapidez las grietas que se producen con el paso del tiempo para evitar la deformación de la construcción y los elementos que componen la edificación, por ejemplo, tuberías, ventanas o paredes, las que si no son solucionadas, pueden poner en peligro la estabilidad de la estructura y a las personas que habitan en esta.

1.3.3. Inestabilidad en pendientes y taludes

Una pendiente es un declive del terreno respecto a la horizontal. La inclinación de la pendiente es un factor que incide en los procesos de modelado de las vertientes, en las cuales suele haber un cambio brusco. Para conocer la medida de la pendiente se utiliza el instrumento de medida denominado clinómetro. La medida del indicador suele expresarse en porcentajes y se calcula dividiendo la altura de la pendiente entre su base y luego con la multiplicación del resultado por 100 (Yescas y Cabañas, 2020).

La pendiente se caracteriza por tener seis formas distintas: plano, cóncavo, convexo, terracedo y complejo. Además, posee diferentes grados, los cuales se miden con el clinómetro; sin embargo, hay ocasiones en las que no puede medirse por lo que se debe recurrir a las estimaciones de campo calculadas a partir de las curvas de nivel que se presentan en el mapa topográfico.

Usualmente, las gradientes en suelos planos suelen sobreestimarse y en las planicies abiertas son claramente visibles; sin embargo, siempre deben medirse para evitar algún problema causado por el drenaje, el riesgo o la erosión.

Respecto a los taludes, estos son superficies o planos inclinados que se encuentran en una formación antrópica. Se clasifican en dos tipos: naturales y artificiales. El primero se refiere a aquellos formados en la naturaleza por medio de diversos agentes geológicos; el segundo es producto de la acción antropogénica y tiene por objetivo la construcción de presas, carreteras, terraplenes, ferrocarriles. Ahora, la inestabilidad de los taludes se debe a diversos factores, como los suelos inestables, los cuales se mueven hacia la parte inferior debido a una fuerza mayor; los suelos no cohesivos, por presentar una textura granular o arenosa; el incremento de peso, la disminución de cortante, la reducción de los materiales y el aumento de la porosidad por exceso de erosión, las cuales facilitan el deslizamiento de la tierra (Portillo, 2020).

Por otro lado, la inestabilidad de las pendientes es consecuencia de las condiciones hidrogeológicas, como las erosiones, los arrastres y el agua. Cabe precisar que la geometría y el relieve tienen un rol definitivo cuando se quiere conocer la pendiente, principalmente, en las regiones montañosas. Por otro lado, si la pendiente es muy baja, los flujos de tierra o barro ocasionan su inestabilidad en lugares determinados, por lo cual es importante medir los pendientes para identificar si hay o no algún riesgo de inestabilidad.

1.4. Métodos de estabilización de suelos

Para estabilizar los suelos y evitar el futuro derrumbe de las edificaciones, se han elaborado métodos para garantizar que el suelo se mantenga firme al construir y a lo largo del paso del tiempo. Estos métodos son los siguientes:

1.4.1. Compactación del suelo

La compactación del suelo es la pérdida de volumen de una masa determinada del suelo por causas externas. Abarca cuatro medidas y formas: infiltración del agua, densidad del suelo o porosidad, evaluación en calicatas y resistencia a la penetración. La densidad es el mejor método porque no es influenciada por agentes externos, como la humedad; a diferencia de la resistencia y la infiltración, que sí son sensibles a estos factores (López *et al.*, 2020).

Grosso *et al.* (2022) indican que la compactación del suelo es una propiedad influenciada por la variabilidad temporal y espacial, las cuales deben conocerse para identificar las zonas umbrales y conflictivas. La compactación se manifiesta como una ruptura de equilibrio entre las estructuras, por ejemplo, las grietas, los poros y las fisuras; esto conlleva a la pérdida de aireación, la reducción en el drenaje, la pérdida de la actividad biológica y la reducción de la humedad. Debido a esto, actualmente, se le considera un problema común y sus causas principales son el inadecuado uso de implementos o máquinas, pues se deja en segundo plano el correcto manejo del suelo, lo cual representa un grave problema porque reduce su calidad, al alterar el flujo del aire y el agua, y disminuir la absorción de nutrientes; como consecuencia, se obtiene un suelo poco apto para las edificaciones (Rasche *et al.*, 2020).

Para evitar la compactación del suelo se debe tomar acciones preventivas y correctivas a fin de garantizar su buen estado, sobre todo, en la época actual, en la que muchas tierras agrícolas donde se ha aplicado un alto uso de químicos han sido vendidas para la construcción de edificios; motivo por el que el suelo se ha deteriorado con el paso del tiempo. Por ello, para garantizar una construcción duradera, los expertos deben evaluar el área y aplicar las mejores técnicas y maquinarias a fin de reducir el riesgo de compactación, por ejemplo, controlar el peso de la maquinaria, el número de pasadas, el contenido hídrico del suelo, la presión ejercida por los neumáticos, entre otros.

1.4.2. Adición de materiales estabilizantes

Los materiales estabilizantes son aquellos productos que se agregan al suelo para modificar sus propiedades, especialmente, su grado de reacción al agua, y para cambiar la granulometría al introducir nuevos materiales. De acuerdo con Rivera *et al.* (2020), la estabilización de los suelos incrementa su capacidad de soporte, aumenta su resistencia, reduce la permeabilidad del agua y disminuye la plasticidad. Para obtener estos beneficios, se han creado sustancias que se añaden a los suelos con el fin de estabilizarlos, las cuales se denominan materiales estabilizantes, entre los cuales destacan el cemento Portland, la cal y las cenizas volantes (Rivera *et al.*, 2020):

Estabilización con cemento Portland

El cemento Portland es el más utilizado en el mundo porque posee la capacidad de estabilizar una gran diversidad de suelos, principalmente, los arcillosos y arenosos. Este material se emplea como base en la infraestructura civil, para construir diques, terraplenes y carreteras, así como para estabilizar las cimentaciones. Su implementación data de hace más de ochenta años y ha demostrado ser efectivo al mezclarse con el suelo. La estabilización del suelo con el cemento presenta mecanismos, como el intercambio de cationes, las reacciones puzolánicas, la floculación, la carbonatación y la floculación, de los cuales la hidratación y el intercambio de cationes son los más importantes para estabilizar los suelos cohesivos.

Estabilización con cal

La cal es un material altamente utilizado para estabilizar los suelos. Se usa de diferentes maneras, lo cual depende del tipo de suelo. Respecto a sus propiedades mecánicas se ha identificado que incrementa el índice CBR hasta 3 %, motivo por el que es recomendado para ser utilizado como base en las carreteras; además, aumenta la durabilidad y reduce la plasticidad del suelo nativo.

Estabilización con cenizas volantes

Las cenizas volantes se implementaron para estabilizar los suelos ante los inconvenientes económicos y ambientales que surgieron por los dos productos anteriores. Se caracteriza por ser sostenible y por servir como relleno estructural en terraplenes y como material estabilizador para construir carreteras.

1.4.3. Uso de geosintéticos y geotextiles

Los geosintéticos son materiales utilizados para mejorar las propiedades del suelo donde se llevarán a cabo obras, como carreteras o edificaciones. Estos productos han sido creados basándose en diversos polímeros derivados del petróleo para que el producto cumpla de manera satisfactoria sus funciones: protección, drenaje, separación y refuerzo. Los geosintéticos se caracterizan por ser inertes a una gran cantidad de agentes químicos, lo cual es favorable para garantizar el reforzamiento del suelo y permitir la construcción de taludes y muros verticales (Revista Costos, 2021).

Si bien su alto uso se debe a los beneficios que brinda, no es la única razón por la cual se emplea, ya que ha demostrado ser económico cuando se realizan construcciones tanto grandes como pequeñas. Así también, se debe a su sostenibilidad, pues los geosintéticos permiten construir sin dañar el medioambiente, por ejemplo, con las geomallas —un tipo de geosintético— se puede emplear el suelo como material de construcción para edificar los muros en lugar de usar concreto; con las geomembranas se pueden construir reservorios de agua; y con las geomantas se puede controlar la erosión o brindar soluciones a la revegetación.

Otros geosintéticos que también son utilizados con frecuencia son las geobolsas, que tienen una gran resistencia para evitar pérdidas del material del relleno; las geoceldas, que son materiales utilizados como un confinamiento celular y para aumentar la capacidad de carga del suelo sin alterar el medio

ambiente; las geomallas, los cuales están compuestos por filamentos y se caracterizan por ser durable y adherirse al terreno de trabajo; las geomembranas, que actúan como barreras sintéticas impermeables de partículas y/o fluidos en los revestimientos de canales, lagunas y depósitos de agua (Revista Costos, 2021).

Uno de los tipos que más destaca son los geotextiles, que son elementos laminares, porosos y flexibles utilizados en el sector construcción por las diversas funciones que posee, como la separación, la filtración, el refuerzo y el drenaje. Debido a que son flexibles, tienen una gran resistencia a la retención de partículas del suelo y son permeables a fluidos; son altamente usados en obras de minería y construcción, ya que garantizan la estabilidad de los suelos. Por esto, es importante conocer las características del suelo a fin de elegir el material que garantizará su estabilidad y, por ende, la de la construcción por un tiempo prolongado.

CAPÍTULO II

PRODUCTOS QUÍMICOS

Los productos químicos se han convertido en un componente esencial para gozar de comodidades. Su producción ha facilitado la vida de las personas en la medida en que las amas de casa pueden limpiar sus hogares y mantenerla sin gérmenes para evitar el desarrollo de enfermedades, los agricultores pueden mejorar la producción alimentaria al disponer de pesticidas que evitan la aparición de plagas, y los farmacéuticos pueden desarrollar fármacos para cada tipo de enfermedad. Estos beneficios se reflejan a diario en la sociedad, por lo cual son muchas las industrias que han incorporado a sus actividades el uso de productos químicos para obtener grandes resultados e incrementar su producción.

En este sentido, el uso de productos químicos brinda diversos beneficios para las personas porque mejora la producción en determinadas industrias e incrementa los niveles de bienestar; sin embargo, también se ha identificado que este tipo de producto es la principal fuente de contaminación del aire, el agua y el suelo, lo cual ha generado opiniones diversas en cuanto a su uso. En este contexto, es preciso analizar la situación de cada producto químico, con la finalidad de conocer los perjuicios que ocasionan en el ambiente y en la salud de las personas, y así determinar si deben seguir produciéndose o, por el contrario, optarse por otra alternativa más ecológica.

Por este motivo, los productos químicos han sido clasificados en tóxicos, no tóxicos, orgánicos, inorgánicos, naturales y sintéticos, clasificación con la cual, en ciertos países, se ha prohibido su elaboración o importación para evitar el daño ambiental. Así también, se han buscado alternativas para reducir el im-

pacto de los productos químicos en el ambiente y garantizar la sostenibilidad; caso contrario, la estabilidad de los ecosistemas podría ser alterada y ocasionar la muerte de diversas plantas o animales, o de seres humanos que están en contacto directo con el químico. Por ello, también es necesario que los usuarios se informen de los productos que emplean para que no sufran daños colaterales y eviten contaminar el ambiente.

2.1. Introducción a los productos químicos

Un producto químico es un compuesto fabricado mediante procesos industriales complejos, con el propósito de mejorar la calidad de vida de la población. Doménech y Pedroche (2019) indican que los productos químicos son sustancias o mezclas obtenidas por medio de un proceso industrial y son indispensables para la sociedad, porque están presentes en el entorno profesional y doméstico, ya que pueden ser utilizados de diferentes maneras. No obstante, también pueden dañar la salud y el medioambiente, motivo por el cual su fabricación y uso siguen causando preocupación por los efectos nocivos que originan en el entorno. Cabe precisar que el término “producto químico” describe únicamente a los elementos químicos y sus compuestos; es decir, solamente a las sustancias químicas que forman parte de las reacciones químicas. Se caracteriza por presentarse en diferentes grados de pureza, que puede ser técnicas, de laboratorio, químicamente pura, reactiva, reactiva analítica, U.S.P. y N.F.

Al respecto, una manipulación inapropiada de los productos químicos en el hogar o en el espacio de trabajo, por la falta de información, incrementa el riesgo de que la persona pueda desarrollar algún tipo de enfermedad por la exposición prolongada (Murcia, 2020). Considerando lo expuesto, es preciso que, sobre todo a las personas que trabajan en la elaboración de productos químicos, se les brinde información sobre la clasificación y las propiedades de las sustancias que emplean durante el proceso de fabricación a fin de reducir el impacto negativo en la salud del ser humano y de la naturaleza.

Los productos químicos son de diferente naturaleza: para el uso doméstico (lejías, limpiadores), agrícola (plaguicidas, insecticidas, biocidas) o para ser empleado en laboratorios, peluquerías, tintorerías, fotografía, mantenimiento, entre otros. Para garantizar que su uso no perjudique a los usuarios y al entorno, en el Perú se promulgó el Decreto Legislativo N.º 1570, cuyo objetivo es proteger la salud de las personas y el medioambiente por medio de la adopción de mecanismos y medidas para reducir los riesgos vinculados con la gestión de sustancias químicas. Para cumplir con dicho objetivo, en la ley también se añade los procesos de supervisión, fiscalización y sanción, de tal manera que se comprueba si los trabajadores cumplen o incumplen las obligaciones previstas en la norma (Presidencia de la República, 2023).

2.2. Clasificación de los productos químicos

Los productos químicos tienen una clasificación diversa. En una de estas tipologías se clasifica los productos químicos de acuerdo con su peligrosidad: peligros físicos, peligros para la salud y peligros para el ambiente. Los peligros físicos son aquellos que provocan incendios, corrosión de metales y explosiones. Algunos de los productos que los causan son los gases inflamables, los aerosoles, los líquidos inflamables, los sólidos pirofóricos, los gases a presión, los peróxidos orgánicos, los explosivos insensibilizados, entre otros.

Los peligros para el ambiente causan efectos a largo o corto plazo sobre el ecosistema, especialmente, sobre la capa de ozono; los peligros para la salud causan efectos crónicos o agudos en la salud de las personas. Entre los causantes de este último tipo de peligro se incluyen productos como las toxinas reproductivas, sustancias cancerígenas, corrosivas, irritantes, sensibilizantes, neurotoxinas, nefrotoxinas, hepatotoxinas y agentes que dañan los ojos, la piel, el hígado o las membranas mucosas (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022).

Otra de las clasificaciones que más destaca se divide en seis tipos: naturales, sintéticos, orgánicos, inorgánicos, tóxicos y no tóxicos.

2.2.1. Productos químicos naturales vs. sintéticos

Los productos químicos naturales son aquellas sustancias originadas en la naturaleza sin intervención antropogénica e incluyen derivados del gas natural, la crudo, la lana y la sal marina. De acuerdo con De las Heras (2020), estos productos se comportan como compuestos activos y se consideran como una fuente de estructuras privilegiadas; además, tienen tres características estructurales importantes: quiralidad, complejidad y diversidad.

Los productos químicos naturales son compuestos de moléculas orgánicas que se caracterizan por tener una estructura química compleja, en el que se incluyen los metabolitos primarios y secundarios. Los metabolitos primarios son el resultado del metabolismo energético. Los metabolitos secundarios son moléculas no esenciales para el crecimiento, el desarrollo y la reproducción del organismo que los produjo. Este tipo de metabolitos se clasifica según estructura química, composición, solubilidad y ruta de síntesis, de los cuales la clasificación más sencilla se basa en su estructura química, la cual se divide en tres grupos: compuestos de hidrógeno y carbono, compuestos fenólicos y compuestos que contiene nitrógeno (Campos, 2019).

Los productos químicos sintéticos son compuestos sin presencia de carbono en su estructura. Estos productos son utilizados principalmente para controlar las plagas de insectos en el suelo, follaje o frutos para evitar enfermedades (Jiménez *et al.*, 2021). Así también, destacan el papel y los rayos, los cuales se obtienen de la celulosa.

2.2.2. Productos químicos orgánicos vs. inorgánicos

Los productos químicos orgánicos son aquellos compuestos constituidos por carbono. Tienen las siguientes características: reactividad lenta, mal conductor de la electricidad, constituido por hidrógeno, no se disuelve en agua, bajos puntos de fusión y ebullición, alta combustibilidad y volatibilidad, y un

enlace covalente. Además, tienen una gran variedad porque pueden usarse en diferentes ámbitos, como en la industria y los hogares; no obstante, por la complejidad de algunos de estos productos, su uso puede ser restringido. Algunos ejemplos de productos orgánicos son el alcohol, el metano, entre otros.

Chávez-Sifontes (2019) afirma que alrededor del 10 % de los productos químicos orgánicos se producen a partir de la biomasa, de los cuales la mayor parte de estos tiene un peso molecular elevado, por ejemplo, ésteres derivados de celulosa, oleoquímicos, entre otros. Si bien gran parte de los productos orgánicos se encuentran en la naturaleza, algunos de estos inciden negativamente en la calidad del agua; es decir, suponen un peligro, aunque son pocos si se comparan con los productos químicos inorgánicos.

Al respecto, Forde *et al.* (2019) manifiestan que el principal contaminante químico orgánico está en las aguas superficiales, y se denomina microcistina, que es una toxina producida por cianobacterias y tiene la capacidad de alterar la seguridad y la calidad del agua destinada al consumo humano o recreativo. El peligro de contaminación por los productos orgánicos incrementa con el paso del tiempo y afecta sobre todo a los países en vías de desarrollo, donde las aguas residuales no son debidamente tratadas, las cuales provienen de actividades agrícolas e industriales, operaciones mineras, vertederos ilegales y derrames accidentales. Por ello, es necesario que toda agua contaminada sea tratada a fin de evitar el aumento de la microcistina y se garantice la salud y calidad de vida de la población.

Los productos químicos inorgánicos son compuestos sin presencia de carbono en su estructura, excepto aquellos compuestos simples de carbono que han sido incluidos en la química inorgánica por razones históricas o porque poseen la estructura típica de las sustancias inorgánicas. Los productos inorgánicos incluyen a los ácidos, las sales, los metales, los minerales y las bases, entre los que destacan el ácido nítrico, la sosa cáustica, el ácido clorhídrico, el

amoníaco y el ácido sulfúrico. Así también, comprenden al carbono elemental y otros compuestos de carbono como el monóxido y dióxido de carbono, los carburos y el ácido carbónico. Cabe precisar que su nomenclatura está regulada por la IUPAC.

2.2.3. Productos químicos tóxicos vs. no tóxicos

Los productos químicos tóxicos son sustancias dañinas que afectan al medioambiente y la salud humana (causan dolor de cabeza, convulsiones, náuseas). La toxicidad depende de tres factores: características químicas, dosis en que se encuentra y características del organismo expuesto (Ondarse, 2021):

- Características químicas: los efectos que cause en el organismo y su contrarrestabilidad depende de la composición de cada producto.
- Dosis en que se encuentra: implica la concentración y la cantidad del producto, por ejemplo, ingerir un bidón de kerosene implica una mayor toxicidad a diferencia si se toma una cucharada.
- Características del organismo expuesto: algunos productos son más tóxicos en un cuerpo que en otro, debido a que hay organismos altamente sensibles a ciertas sustancias y causan alergias.

Algunos de los productos tóxicos dañan los componentes estructurales y el metabolismo de las células, lo cual se refleja en la aparición de enfermedades malignas, como el cáncer (Chimenos-Küstner y Marques, 2019). Debido a esto, se sugiere que las personas que trabajen con estos productos sigan las instrucciones de seguridad del producto, a fin de evitar accidentes y el desarrollo de enfermedades por un manejo inadecuado de la sustancia.

Los productos químicos no tóxicos no son dañinos ni para el hombre ni para el ecosistema. En la actualidad, se intenta incrementar la cantidad de productos no tóxicos y no invasivos, pues los tóxicos provocan daños en la salud y no pueden dejar de utilizarse, en ciertos casos, al ser sustancias necesarias para la elaboración de otros productos o para la limpieza del hogar.

2.3. Uso de productos químicos en diferentes sectores

Los productos químicos se han convertido en un elemento indispensable en las industrias para realizar labores. Dentro de las industrias manufactureras, químicas, farmacéuticas, entre otras, se destaca el empleo de productos químicos como elementos para mezclar, procesar materias primas o para ser comercializado en el mercado. Para conocer el uso que se les otorga a estos productos, a continuación se detalla su empleo en diferentes áreas.

2.3.1. Industria química y manufacturera

La industria química posee gran relevancia en el mundo. En esta se realizan diversas actividades de naturaleza económica, tales como la transformación y obtención de compuestos y materiales, para conseguir productos que puedan ser ofertados en el mercado para consumo directo o como intermediario para crear otros productos.

En esta industria suele usarse con frecuencia el hidrógeno, pues sirve como reactivo para producir amoníaco, metanol, fibras textiles, y productos intermedios para fabricar farmacéuticos y plásticos (Martínez-Barrera *et al.*, 2022). Cabe precisar que el hidrógeno suele obtenerse del reformado del gas natural. Pese a su importancia en las demás industrias, se ha convertido en una de las que genera mayor impacto negativo en el ambiente, como consecuencia de las emisiones de carbón que produce durante la ejecución de sus actividades.

Respecto a la industria manufacturera, esta es una actividad económica importante en el sector productivo de cada país porque garantiza su crecimiento económico (García *et al.*, 2020). En este sector se incluyen a las actividades dedicadas a transformar sustancias o materiales con el objetivo de obtener nuevos productos que sirvan para la reconstrucción de maquinarias, el acabado de productos, el ensamble de partes y demás.

En este aspecto, los químicos también cumplen un rol esencial en las actividades que se desarrollan en este sector. Esto se debe a que la industria manufacturera incluye la transformación química o física de materiales, componentes o sustancias, los cuales proceden de la ganadería, agricultura, pesca, silvicultura, entre otros, para elaborar nuevos productos. En este aspecto, los productos químicos son vitales para la industria manufacturera, pues con los productos que esta brinda, el sector de manufactura puede proceder con sus actividades y transformar los elementos que usará para crear otros artículos.

2.3.2. Agricultura y pesticidas

Los plaguicidas son compuestos químicos empleados para controlar las enfermedades y parásitos que atacan los cultivos. Se clasifican según su actividad biológica en herbicidas, insecticidas, rodenticidas y fungicidas. Su uso ha sido beneficioso para los agricultores, pues son efectivos, de fácil empleo y flexibles; además, su amplio espectro permite que actúen simultáneamente entre varias plagas y patógenos, lo cual mejora la calidad del producto, disminuye el trabajo en exceso en el campo y garantiza la producción (Castillo *et al.*, 2020).

Los pesticidas o plaguicidas son utilizados para controlar las plagas en los campos de cultivo y garantizar la producción de alimentos. Pese a que los plaguicidas fueron desarrollados para funcionar con un riesgo mínimo para el medioambiente y la salud humana, esta práctica ha llegado a causar efectos dañinos en la salud de las personas que trabajan de forma directa con estos químicos, debido a la reactividad biológica que provocan, la cual es potencialmente peligrosa para la salud (Cruz y Placencia, 2019). Debido a esto, la intoxicación por pesticidas ha sido reconocida como una problemática de salud entre los agricultores a nivel mundial. En el caso de Perú, para evitar el crecimiento de la tasa de afectados por el uso de plaguicidas, el Servicio de Sanidad Agraria (citado en Castillo *et al.*, 2020), ha promulgado un listado de pesticidas

prohibidos y restringidos, los cuales no deben adquirirse por los efectos que provoca. Los pesticidas restringidos son el metamidofos y el paraquat; algunos de los prohibidos son aldrin, dieldrin, binapacril, dinoseb, captafol, clordano, lindano y mirex.

Otra de las medidas implementadas para no ocasionar daños a los organismos benéficos y aminorar los costos de producción fue el uso de diversos insecticidas botánicos, como el aceite de pogam, aceite de neem, aceites esenciales y rotenona; además de dos tipos clases principales de insecticidas: los neonicotinoides y los piretroides. Los pesticidas botánicos son importantes para los cultivos porque actúan como protectores naturales y su preparación no daña el medioambiente, pues se obtiene de raíces, polvos de flores, tallos, hojas y semillas (Zelaya-Molina *et al.*, 2022).

En general, los agroquímicos puede ser altamente perjudiciales y tóxicos para la salud humana y el medioambiente porque, en su estructura, poseen sustancias químicas que, cuando se aplican constantemente, impactan en los elementos de la naturaleza, los cuales sufren una serie de transformaciones y alteraciones que perjudican el crecimiento del cultivo y, a largo plazo, causan la pérdida de la fertilidad del suelo, la disminución de la diversidad genética, la aparición de nuevas enfermedades y plagas, incremento de la toxicidad en las plantas y la acumulación de residuos en el mar o el río.

2.3.3. Medicina y productos farmacéuticos

Los productos farmacéuticos son un grupo de compuestos químicos ampliamente utilizados en el mundo. Son sustancias naturales o sintéticas creadas para el uso humano y veterinario, con el propósito de aliviar sus malestares. Los productos farmacéuticos contienen una mezcla o sustancias que se agregan para garantizar su uso directo en terapia. Cada uno de los productos es elaborado con productos químicos diferentes destinados a combatir un virus en especí-

fico, pese a ello, se identifica que hay dos elementos que siempre componen los productos farmacéuticos, que son los siguientes (Grupos PCC, 2020):

- API (ingredientes farmacéuticos activos): son compuestos químicos obtenidos por medio de síntesis o cuando se aíslan de materias primas farmacéuticas. Constituyen aproximadamente el 30 % de la composición y actúa como el principio activo del fármaco. Se utiliza ácido clorhídrico de muy alta pureza (37 %) o el ácido monocoroacético para realizar la síntesis química de los API. Los API son empleados en gran cantidad para producir productos, como vitaminas, ibuprofeno, glicina y demás.

- Excipientes: son los portadores de los fármacos. Son compuestos sintéticos o naturales carentes de propiedades farmacológicas y se utilizan como vehículos de sustancias activas, con el fin de transferir el fármaco y no afectar sus características. Constituyen el 50 % de la composición.

Se ha identificado que los productos farmacéuticos son compuestos poco biodegradables, por lo que al ser desechados entran en contacto con las aguas residuales. De ahí que se les considere contaminantes ambientales, aunque aún se desconoce los efectos que causa en el ecosistema. Pese a tener efectos contaminantes, existen pocos avances para eliminar estos productos durante el proceso de tratamiento de agua residuales, motivo por el que el uso y la disposición inadecuada de los medicamentos requiere ser investigado; además de los efectos nocivos que ocasionan en los organismos acuáticos y terrestres (Manzollillo y González, 2019).

2.4. Impacto ambiental de los productos químicos

A mediados del siglo XX, se observó una creciente tasa de problemas ambientales causados por las intensas y diversas actividades antropogénicas, el desarrollo tecnológico, el uso y el consumo de los recursos naturales renovables y no renovables y la industrialización, los cuales provocaron presión en

el ecosistema alta para ocasionar su alteración. En la actualidad, se reconoce que la población está frente a un cambio negativo, como es el cambio climático, la degradación de suelos, la reducción de la capa de ozono, la contaminación del agua, la pérdida de la biodiversidad, el cambio de la cobertura vegetal, los daños a arrecifes, la desertificación, la pérdida y el deterioro de humedales, entre otros. Todos los procesos señalados se interrelacionan, lo cual ocasiona que los efectos sean más complejos y a mayor escala (Moreno, 2022).

La contaminación ambiental causada por productos químicos es un problema que debe ser solucionado pronto, pues no solo pone en riesgo la salud de la población, también ocasiona el deterioro del ecosistema. Los productos químicos que más impactan en el medioambiente son los siguientes (Grijalva *et al.*, 2020):

- **Pesticidas:** estos productos químicos son usados para eliminar los microorganismos dañinos y no deseados de las plantas o de las granjas. Las partículas provenientes de los plaguicidas se instalan en el suelo y son recolectadas por el agua de lluvia y llevadas a los arroyos, lo que conlleva a contaminar la flora marina.

- **Metales pesados:** los elementos usados en la industria manufacturera, como el mercurio, el plomo, el cobre, son nocivos. Estos contaminan el agua, ya que son vertidos directamente de la fábrica al río luego de culminar el proceso, lo cual ocasiona que el ecosistema marino sea afectado, así como los animales, pues consumen los productos químicos al beber el agua del río.

- **Productos derivados del petróleo:** el petróleo crudo es utilizado para producir productos químicos, como plásticos, energía de combustibles, entre otros; no obstante, por el inapropiado uso de los productos químicos, estos llegan al agua y reducen su calidad.

- **Productos farmacéuticos:** los medicamentos tienen una serie de efectos nocivos en el ambiente, principalmente, los vencidos, pues al ser elimina-

dos inadecuadamente generan consecuencias negativas en el medioambiente, como la contaminación del agua potable, la liberación de contaminantes, la eliminación de microorganismo necesarios para el desarrollo del ecosistema, entre otros.

En efecto, el planeta se encuentra amenazado por diferentes acciones y factores, de los cuales destacan los productos químicos (plaguicidas, insecticidas, metales pesados, medicamentos) que actúan como contaminantes ambientales y dañan principalmente el agua y el suelo. En este aspecto, es necesario atender y solucionar el impacto que los productos químicos tienen sobre el medioambiente y la vida de las personas, pues la contaminación altera el ecosistema y su balance. Además, con la modernización, la contaminación ha alcanzado su punto máximo, lo que ha conllevado al calentamiento global y al desarrollo de enfermedades relacionadas con la contaminación, como cáncer de pulmón, cardiopatía, accidentes cerebrovasculares, entre otras. (Viteri, 2021). Frente a esta situación, las industrias y las personas no pueden quedarse como espectadores, sino que deben volverse actores de este cambio para mitigar el problema de la contaminación y evitar más daños al ecosistema y a la salud humana.

CAPÍTULO III

IMPACTO AMBIENTAL DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS

Los productos químicos son importantes para realizar actividades de diversa naturaleza, debido a su alta eficacia para cubrir las necesidades de la población. Muchos productos son beneficiosos, y esto se evidencia en la producción de diversos sectores, como el agrícola, pues los fertilizantes y pesticidas ayudan al crecimiento de las plantas; también en el sector textil, ya que los productos químicos sirven para teñir las telas. Este tipo de productos son fundamentales para garantizar la producción de diversas empresas, pues aceleran el proceso y elevan los ingresos económicos para los empresarios y trabajadores. En este aspecto, la fabricación de productos químicos no puede ser detenida, ya que su escasez puede ocasionar el retraso de diferentes actividades y, por tanto, el fracaso de los productores o empresarios.

Si bien los productos químicos demuestran ser útiles en todo momento, esta utilidad es opacada por los efectos que producen en la salud de las personas y, principalmente, en el medioambiente. Esto se debe a que muchos de los daños ocasionados en los ecosistemas se originan por el uso de productos químicos, como los pesticidas, los cuales emiten partículas que se mezclan con el aire y ocasionan su contaminación, el deterioro de la capa de ozono, envenenamiento de los pájaros, entre otras consecuencias; así también, los productos químicos contaminan el agua y el suelo, provocando su degradación y desequilibrio, puesto que al ser vertidos o expuestos al ambiente mediante el desecho de envases de plásticos, se mezclan con los componentes de la naturaleza y alteran su equilibrio.

Por tanto, los productos químicos tienen, en su mayoría, un impacto negativo en el medioambiente, razón por la que es urgente que se establezcan medidas para detener los daños que generan, lo cual puede ser posible mediante la adopción de medidas ecoamigables (incorporación de la química verde en las industrias) y de políticas enfocadas en el cuidado ambiental, a fin de evitar un impacto negativo sobre los humanos, las plantas y los animales.

3.1. Definición y conceptos básicos

El impacto ambiental es el resultado de una actividad antropogénica que ocasiona daños en el medioambiente, ya que altera el equilibrio de los ecosistemas. Valencia y Riascos (2022) afirman que el impacto ambiental es el cambio o alteración del medioambiente provocado por la ejecución de una actividad o proyecto en un área específica. Estos impactos ocasionados por el hombre se dan según la ocupación, el agotamiento y la contaminación.

Cuando se habla del impacto según la ocupación, se entiende que este se origina por la localización de actividades que degradan los recursos naturales, como la flora, el agua y el suelo. Al respecto, la actividad industrial pone en grave peligro las diferentes formas de vida, entre ellas, la vida humana. Por otra parte, el impacto por agotamiento se produce sobre el recurso, es decir, se extrae una cantidad desmedida que conlleva al consumo total del recurso. El impacto por contaminación se genera cuando las actividades antropogénicas impactan negativamente en los recursos naturales, puesto que ocasionan su contaminación, disminución de los ríos, pérdida de la capacidad productora del suelo y de la capa orgánica.

Para evaluar el impacto ambiental, primero se realiza un estudio sobre este. Se trata de un estudio objetivo, técnico, interdisciplinario y pluridisciplinario realizado para predecir el impacto ambiental que deriva de determinadas actividades o proyectos humanos (Moreno *et al.*, 2022). Así también, es un documento básico para iniciar el proceso de evaluación del impacto ambiental.

En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, este se define como un instrumento de política ambiental establecido con el propósito de prevenir, mitigar y restaurar los daños ocasionados en el medioambiente producto de la actividad humana, y regular las obras para reducir o evitar sus efectos negativos en los ecosistemas. Hernández *et al.* (2019) señalan que la evaluación del impacto ambiental surgió a fines de la década del 60, con el objetivo de introducir las primeras formas de control entre la interacción directa o indirecta del hombre con el medioambiente y restaurar el daño ambiental y los recursos renovables.

Así también, los autores indican que la evaluación ambiental está siendo vista como un mecanismo para lograr la participación de la sociedad, de manera que esta se involucre en el proceso de decisión cuando los individuos observen que los proyectos implementados por las empresas van a perjudicar el ecosistema del área. En este aspecto, se demuestra que la evaluación ambiental es un instrumento esencial para mejorar a largo plazo la viabilidad de los proyectos y programas; además, al aplicarlo, se reducen las omisiones o los errores que pueden implicar altos costos sociales, ambientales y económicos.

En el Perú, la evaluación del impacto ambiental es asumida por el Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), que es un sistema único y coordinado establecido con el objetivo de identificar, prevenir, supervisar y corregir anticipadamente los impactos ambientales y negativos. El SEIA actúa en concordancia con la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la cual también interviene en el proceso de evaluación cuando el proyecto afecta a los recursos hídricos. Conjuntamente, el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Sernanp) también emite su opinión cuando el proyecto o las actividades afectan a las áreas naturales protegidas o a su zona de amortiguamiento; por último, el Viceministerio de Interculturalidad del Ministerio de Cultura también opina si el proyecto es realizado en reservas territoriales. Ahora, para la evaluación de

impacto ambiental (EIA), se sigue un determinado proceso, el cual se divide en cuatro etapas (Ministerio del Ambiente, 2015):

a. Clasificación del tipo de estudio ambiental: el titular del proyecto presenta a la autoridad su solicitud de clasificación, además de adjuntar una preliminar evaluación ambiental, el cual sirve para que la autoridad determine si el proyecto es viable. Si se determina que el proyecto corresponde a la categoría I, la autoridad emite la certificación ambiental y se aprueba la evaluación ambiental presentada. En otros casos, se asigna la categoría II o III, además de aprobar los términos de referencia para la elaboración del EIA detallado o semidetallado.

b. Elaboración del EIA: el titular del proyecto procede a elaborar el EIA detallado o semidetallado basándose en los términos de referencia aprobados. En esta segunda fase se levanta la información de línea base y se instauran algunos mecanismos de participación ciudadana.

c. Evaluación del EIA por la autoridad competente: el proceso de evaluación del EIA es realizado en un tiempo de 90 días hábiles, de los cuales 40 días son para la revisión y evaluación, 30 días para la subsanación de observaciones y 20 días para la expedición de la resolución respectiva. El proceso de evaluación del EIA se realiza en 120 días hábiles: 70 días para la evaluación, 30 días hábiles para la subsanación de observaciones y 20 días para la expedición de la resolución.

d. La aprobación del EIA: la resolución que aprueba el EIA es una certificación ambiental que brinda permisos, licencias, autorizaciones u otros requerimientos al titular para que ejecute su proyecto

Aunque en las últimas décadas se ha mostrado mayor preocupación por evitar que las actividades realizadas por el hombre incidan negativamente en el medioambiente, todavía es necesario que se tomen más medidas en lo que respecta a los daños causados anteriormente, los cuales no solo han afectado

los ecosistemas, sino también la salud de la población. Algunos de los daños ambientales más significativos que surgieron en décadas anteriores son los siguientes (Ivette y López, 2020):

- Estrés hídrico: muchas regiones son víctimas de sequías prolongadas e intensas, sobre todo, en África meridional, Asia meridional y el Mediterráneo.
- Calentamiento del Ártico: el hielo del Ártico se redujo en 2.7 % y sigue disminuyendo, principalmente, en la época de verano en 7.4%.
- Aumento de los fenómenos climatológicos: el cambio de temperatura intensifica la transformación de los fenómenos meteorológicos.
- Lluvia ácida: afecta la calidad y los recursos de los mares, suelo, lagos, ríos, flora y fauna.
- Incremento de enfermedades: las personas desarrollan enfermedades dérmicas, gastrointestinales y respiratorias.

En este aspecto, es necesario que se desarrollen estrategias para mitigar el impacto negativo de las actividades humanas sobre la naturaleza, no solo con el propósito de conservar la vida animal y vegetal, sino también para garantizar la vida de la población y recuperar el equilibrio ecológico, el cual ha sido gravemente afectado. Por ello, la evaluación del impacto ambiental es un proceso esencial para determinar si los proyectos son viables y no perjudican el medioambiente y la salud humana; así también, es necesario concientizar a la población sobre el desecho de residuos a fin de que tomen medidas que beneficien a su entorno.

3.2. Contaminación del aire por productos químicos

La contaminación del aire o atmosférica consiste en la presencia de partículas y gases que suponen un daño o riesgo para el medioambiente, lo cual se debe a las emisiones de los automóviles, al polvo y a los compuestos químicos de las fábricas (Mayora, 2019). Tuvo su auge en el siglo XVIII, debido

a la urbanización e industrialización, y se convirtió en tendencia mundial en el presente siglo como consecuencia de los problemas significativos que ha ocasionado en el medioambiente debido al transporte motorizado y el desarrollo de gases o líquidos por parte de las fábricas (Mayorga *et al.*, 2020).

Mayorga *et al.* (2020) sostienen que el aire contaminado afecta nocivamente la salud humana, además de ser un fenómeno de preocupación creciente porque no logra mitigarse y ocasiona cada año el empeoramiento de la calidad del aire. En este marco, el 92 % de la población mundial ha sido perjudicada por la contaminación atmosférica, porque gran parte de las personas vive en áreas donde el nivel de calidad del aire es bajo. Asimismo, se estima que alrededor de tres millones de personas (países de bajos y medianos ingresos) en el mundo fallecen anualmente debido al aire contaminado, motivo por el que es preciso que las entidades nacionales y mundiales dedicadas al cuidado ambiental implementen estrategias que eviten el incremento de la tasa de muerte por contaminación atmosférica.

Al respecto, gran parte de los daños ocasionados al medioambiente proceden de los productos químicos, metales pesados, productos derivados de la combustión y solventes. La exposición a estos contaminantes ocasiona una amplia gama potencial de efectos en el medioambiente y la salud humana; para ejemplificar, el plomo retrasa el desarrollo humano y el benceno es una sustancia conocida por causar cáncer.

Ante esta situación, es preciso que el Estado implemente medidas, normas o mecanismos que garanticen un ambiente limpio y faciliten una vida digna y sana a las personas, así como reducir los elementos contaminantes y el riesgo que supone su uso. Para ello, es necesario que el Estado reconozca la importancia de la salud ambiental y la considere un componente esencial en las agendas de protección medioambiental, desarrollo social y salud, a fin de promulgar políticas que reduzcan las fuentes de emisión y controlen de manera eficiente los niveles de contaminación a corto, mediano y largo plazo (Velasco, 2019).

3.2.1. Emisiones de compuestos químicos tóxicos

La emisión es la forma en que las sustancias químicas provenientes de las instalaciones industriales ingresan al suelo, al agua y al aire. Las emisiones al aire son causadas por sustancias gaseosas y partículas liberadas al aire, las cuales son productos de la producción, el consumo y la acumulación de productos, en su mayoría, tóxicos. Así también, alteran la composición de la atmósfera, la quema de combustibles fósiles, el tratamiento de desechos, las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, pero destacan los procesos industriales porque son las industrias las que emiten una gran cantidad de compuestos químicos.

Los compuestos químicos tóxicos que contaminan la atmósfera son los gases de compuestos, por ejemplo, el dióxido de azufre, que proviene de la quema de combustibles. El dióxido de azufre es un contaminante primario que al ser liberado se convierte en trióxido de azufre, como resultado de haberse combinado con el agua de la atmósfera; además, se convierte parcialmente en ácido sulfúrico. Estos dos compuestos son clasificados como contaminantes secundarios, pues surgen del contaminante primario y de otro compuesto ambiental. Otros de los gases que también alteran el aire son el óxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles, los cuales interactúan con el ambiente y alteran su composición; esto se ve reflejado en la aparición de lluvias ácidas y en la salud de las personas, quienes tienden a desarrollar bronquitis (García, 2021).

Al respecto, el Ministerio del Ambiente (2021) manifiesta que los compuestos químicos tóxicos que más contaminación causan son los siguientes:

- **Dióxido de nitrógeno:** es un gas tóxico que afecta el sistema respiratorio. Proviene de la quema de combustibles fósiles, la cual emite partículas que ingresan al aire y actúan como precursor de la lluvia ácida.
- **Ozono:** es un gas que afecta las vías respiratorias. Proviene de la combinación de hidrocarburos, gas óxido de nitrógeno y la reacción de la luz. La emisión del ozono produce el calentamiento global.

- Dióxido de azufre: Es un gas con olor asfixiante. Proviene del carbón, del uso de carbono y diésel. Es el causante principal de la lluvia ácida.

- Partículas y aerosoles: el uso de gas, carbón, petróleo, calderas, madera en motores, elaboración de cemento y actividades de construcción libera partículas en la atmósfera que ingresan al sistema respiratorio y causan mortalidad prematura.

- Monóxido de carbono: proviene de los residuos de petróleo, carbón, gas, kerosene y gasolina.

- Pesticidas: las partículas de los plaguicidas se suspenden en el aire y son transportadas a diferentes zonas del mundo. Debido a su gran extensión, alteran la estabilidad de la atmósfera y ocasionan daños a los cultivos.

En suma, la gran parte de los compuestos que contaminan el aire son causados por el hombre, quien daña el ambiente debido a sus actividades, sobre todo, en las industrias, pues algunos procesos incluyen el uso de sustancias químicas tóxicas que, posteriormente, son liberadas en el aire para continuar el proceso de trabajo. Debido a esto, hoy en día la atmósfera ha sufrido varios cambios, lo que ha conllevado a la destrucción de la capa de ozono y a perjudicar la salud de la población.

3.3. Contaminación del agua por productos químicos

La contaminación del agua o hídrica es aquella producida por la acumulación de sustancias que ocasionan el desequilibrio de la flora y fauna marina. Se le considera uno de los mayores problemas ambientales porque causa fragilidad en el ecosistema acuático al impactar de manera negativa en la biodiversidad marina (Cusiche y Miranda, 2019). Este tipo de contaminación es producto de diversas causas, como el vertido de contaminantes, el calentamiento global, las aguas fecales, la deforestación, el tráfico marítimo y los derrames de combustibles. De estos destaca el vertido de contaminantes, los cuales proceden

de la producción industrial y de los desechos de basura del hogar; también se encuentra el tráfico marítimo, que es causado por el desecho de plásticos que son lanzados al mar por barcos petroleros o pesqueros.

La contaminación del agua produce una diversidad de efectos que deben ser estudiados para preservar la vida acuática. Alguno de estos efectos causados por la actividad agrícola, industrial o doméstica son los siguientes (González-Machado *et al.*, 2021):

- Efectos provocados por grasas y aceites: debido a que son más densos que el agua, se expanden por la superficie a gran escala. Al cubrir grandes superficies ocasionan la reducción de la reoxigenación y la disminución del oxígeno disuelto; como consecuencia, la actividad fotosintética es afectada al igual que la producción interna del oxígeno disuelto.

- Efectos provocados por detergentes: la espuma causada por los detergentes dificulta el acceso de oxígeno a la masa de agua y aumenta la toxicidad del benzopireno, que es un contaminante causante del cáncer.

- Efectos provocados por hidrocarburos: los hidrocarburos aromáticos policíclicos son los más peligrosos y se encuentran en el petróleo. Son cancerígenos y provocan diversos efectos en el ecosistema acuático, como reducción del oxígeno disuelto, disminución de la transmisión de luz, daños en las aves acuáticas (incapacita su flotación y vuelo) y, en el peor de los casos, provoca la muerte.

Para detener el avance de la contaminación del agua deben tratarse las aguas residuales; sin embargo, no es suficiente, porque el tratamiento es pequeño en comparación con la contaminación causada por las industrias o por el tipo de contaminantes que se desechan, como metales, colorantes, fármacos y plaguicidas, que son difíciles de purificar. En este aspecto, en los últimos años ha crecido el interés por brindar soluciones para remover el amplio espectro de contaminantes y garantizar la calidad del agua en diferentes partes del mundo.

3.3.1. Vertidos industriales y residenciales

Los vertidos industriales son la mayor fuente de contaminación del agua; esto se debe a que las industrias usan el agua para diferentes actividades, por ejemplo, refrigeración, procesado, disolvente, entre otros, y no la tratan cuando son vertidas nuevamente al mar o a los ríos. La falta de tratamiento conlleva a alterar el ecosistema acuático y causa acidificación, eutrofización y envenenamiento de la flora y la fauna.

Los vertidos industriales son causados por diversas fábricas, las cuales, dependiendo de los productos que usen, generan residuos más o menos contaminantes que otros. Algunas de las principales industrias que dañan el ecosistema acuático son las siguientes (García-Astillero, 2019):

- Minería: produce metales pesados y sólidos en suspensión, los cuales varían el pH de las aguas receptoras.
- Textil: produce metales como taninos, cromo, sustancias tensoactivas, tintes, colorantes, sulfuros, ácidos y sólidos en suspensión.
- Química inorgánica: produce sustancias químicas, residuos con mercurio, plata, plomo, zinc, compuestos nitrogenados, ácidos y bases.
- Construcción: produce residuos ricos en sólidos en suspensión y metales, los cuales varían el pH de las aguas receptoras, al igual que la minería.
- Naval: produce disolventes, productos químicos y colorantes.

Por otra parte, los hogares suelen verter productos tóxicos al agua cuando usan utensilios de limpieza, los cuales matan las especies acuáticas, insecticidas y pinturas. Ante esta realidad, es importante que el agua sea tratada adecuadamente para eliminar todos los residuos vertidos en los ríos o en el mar; a su vez, es fundamental dar a conocer los perjuicios que ocasionan los productos químicos en el agua, a fin de evitar mayores daños.

3.4. Contaminación del suelo por productos químicos

La contaminación del suelo es la alteración causada por la presencia de sustancias químicas, las cuales conllevan a la degradación y destrucción de la superficie. A nivel nacional, la contaminación de suelo ha ocasionado la degradación de la tierra; por ello, el Ministerio de Ambiente implementó la Estrategia Nacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía 2016-2030, con el fin de reducir y prevenir la degradación y desertificación de la tierra, así como garantizar la recuperación de biodiversidad y una mayor seguridad alimentaria (Universidad del Pacífico, 2021).

En un contexto internacional, se le considera un problema ambiental de suma urgencia porque afecta a toda la población del mundo, razón por la cual se han estado implementando medidas para resolverlo. Esto se debe a que el suelo es un espacio físico natural importante y necesario para el desarrollo de gran parte de los seres vivos, pues es en la tierra donde se ejecutan importantes actividades como la agricultura. Sin embargo, la calidad del suelo ha ido empeorando con el paso del tiempo, así como por el uso de productos químicos, como pesticidas, o de metales pesados para realizar determinadas actividades. Respecto a los metales pesados, estos son contaminantes que tienen un alto nivel de toxicidad, por lo que no solo alteran el ecosistema terrestre, sino también generan graves problemas de salud a la población; además, para extraer los metales del suelo se requiere un tratamiento especial, porque estos quedan atrapados en los procesos de adsorción y precipitación, e ingresan a la cadena alimenticia (Contreras *et al.*, 2023).

Es preciso destacar que existen dos tipos de contaminación que afectan la formación y la estructura del suelo: contaminación antrópica y contaminación natural. De manera general, independientemente del tipo, la contaminación del suelo afecta a la flora y la fauna, debido a que disminuye la variedad de espe-

cies al dificultar su supervivencia. Además, provoca una disminución de la calidad del suelo colindante y lo convierte en un suelo no apto para ser utilizado en actividades agrícolas (Mejía *et al.*, 2019).

En este aspecto, la contaminación del suelo perjudica en gran medida a la agricultura; asimismo, impide el progreso de la ganadería, ya que ocasiona que los animales no puedan alimentarse con pastos de calidad. Por tanto, la contaminación del suelo es un tema grave, pues incide en el desarrollo de actividades humanas y repercute en la alimentación del hombre y de los animales. De ahí que sea necesario que las sustancias contaminantes sean liberadas en menor proporción o controladas para evitar más daño al medioambiente como es la desertificación y la infertilidad del suelo.

CAPÍTULO IV

INCIDENCIA DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EN LA CARRETERA NO PAVIMENTADA EN ÁNCASH

En el Perú, así como en muchos países en vías de desarrollo, los caminos no pavimentados son el componente principal de la red vial. Estos caminos se caracterizan por no tener una estructura adecuada, lo cual impide el desarrollo social y económico de dichos países al impedir el acceso a zonas rurales y urbanas, o a centros de explotación de la industria minera, forestal y agrícola. Las carreteras no pavimentadas suponen un grave problema para la población y las empresas, pues al no haber sido adecuadamente construidas, no resisten el peso de vehículos de cargas y tienden a quebrarse cada cierto tiempo, lo cual exige la nueva construcción de la vía y el mantenimiento continuo de este, que solo provoca el atraso de la nación y un gasto económico excesivo al tener que invertir en nuevos materiales y recursos humanos.

El departamento de Áncash presenta dicho problema, lo que se evidencia en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa. Allí, las actividades de mantenimiento son realizadas con frecuencia; pese a ello, el nivel de transitabilidad que presenta es defectuoso, razón por la cual la capa de afirmado de la superficie de rodadura siempre es afectada por deformaciones, como baches o erosiones, que deterioran rápidamente la carretera. Esta situación genera malestar en la población porque le impide trasladarse de un lugar a otro para ven-

der sus productos o para ir a los centros de trabajo. Ante esta problemática, es esencial realizar un estudio para identificar los materiales que deben emplearse durante la construcción de una carretera, entre los cuales destacan los productos químicos, pues tienen componentes que garantizan la estabilidad del suelo y su pavimentación.

Esta investigación se ha realizado con el propósito de dar a conocer los productos químicos que aportan en la estabilización de los suelos en función a la ubicación del tramo y el tipo de suelo predominante, de manera que las empresas encargadas de realizar construcciones utilicen productos adecuados que garanticen la calidad del pavimento y de edificaciones similares.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la incidencia de los productos químicos Proes100, Mega-soil y PolyCom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa, Bolognesi, 2019.

Objetivos específicos

- Determinar la calidad del material de la subrasante existente y el espesor de la capa de suelo estabilizado para un periodo de diseño de diez años en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.
- Determinar la influencia técnica de los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.
- Determinar la influencia económica de los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

Hipótesis

Hipótesis general

Los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom incidirán en los valores de CBR en un 60% y en los de expansión, en un 100 %; en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa, Bolognesi, 2019.

Hipótesis específicas

- La subrasante existente tendrá un $CBR \geq 6$ % y el espesor de suelo estabilizado para un periodo de diseño de diez años será de 0.15m, en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

- Los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom aumentarán los valores de CBR en un 60% y reducirán la expansión de suelos en un 100 %, en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

- Los productos químicos Proes100 y Polycom superarán en un 50 % el costo de ejecución de obra del producto Megasoil, en la estabilización de suelos de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa

Operacionalización de variables

Las variables utilizadas en el estudio son dos: estabilización de suelos (variable dependiente) y productos químicos (variable independiente). A continuación, se presenta la tabla de operacionalización de las variables.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices
Variable dependiente Estabilización de suelos	La estabilización de suelos es un proceso por el que los suelos en su estado natural son sometidos a un tratamiento, del cual se obtiene un suelo estable y firme. El producto obtenido es resistente a los efectos climáticos y del tránsito (De la Cruz y Salcedo, 2016)	• Caracterización mínima de la sub rasante. • Conocimiento de la demanda actual y dentro de 10 años del tráfico. • Diseño del espesor de la capa de suelo estabilizado.	Diseño	Subrasante adecuada o estable	CBR $\geq$ 6%
					IMDA (Veh/día)
				Demanda de tráfico	Nrep. EE proyectado < 300,000
		• Elección del suelo factible para la estabilización. • Verificación de las especificaciones técnicas como solución básica en carreteras sin pavimento. • Conocimiento de la influencia técnica de los productos químicos.	Influencia técnica	Espesor	e $\geq$ 0.15m
				Zona	Altitud (msnm)
				Plasticidad y análisis granulométrico de suelos	LL, LP, IP
					% de distribución de tamaños
				Parámetros máximos y mínimos	CBR $\geq$ 100%
					Expansión $\leq$ 0.5%
		• Cálculo de costos de mantenimiento, ejecución y monitoreo de las alternativas. • Conocimiento de la influencia económica de los productos químicos.	Influencia económica	Presupuesto de obra	S/. / Km
				Tiempo de ejecución	Mes
				Mantenimiento y monitoreo	Año
					S/. / Km

Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptivo correlacional debido a la consistencia planteada para efectuar el estudio. En la investigación se aplican tres productos químicos no tóxicos (Megasoil, Proes100y PolyCom) de manera individual al suelo apto para la estabilización y según el área de estudio. En cada uno de los productos se describen los parámetros que deben cumplir para ser la solución básica de la carretera no pavimentada. Así también, se interpretan numéricamente los resultados del laboratorio y del gabinete, se determina la relación entre ambas variables y a partir de esta la influencia técnica que los productos químicos utilizados poseen y se identifica la influencia económica por medio del análisis cuantitativo de cada químico. Por último, se determina la incidencia que los productos químicos tienen en la estabilización de los suelos de la carretera no pavimentada situada en Chasquitambo-Llampa (10.35 km).

Enfoque de investigación

El enfoque de investigación es cuantitativo porque se aplica la estadística para explicar los hechos.

Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental porque se recolectaron los siguientes datos: muestras de una cantera, cantidad por cada tipo de vehículo y muestras de afirmado de la plataforma existente. Asimismo, es transversal, pues la recopilación de información realizada en un solo momento, al igual que la evaluación económica; es decir, las cotizaciones de los insumos fueron realizadas en un periodo específico (solo del mes del año).

Contexto geográfico

La carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa comienza en el centro poblado de Chasquitambo (km 0 + 804) y termina en la localidad de Llampa

(km 11 + 154). Este tramo pertenece al camino vecinal Emp. PE-16 (Chasquitambo) en Huayllacayan y ha sido clasificado por el Sistema Nacional de Carreteras con Código de Ruta AN-1317 (MTC, 2016). Geográficamente, esta carretera no pavimentada tiene la siguiente ubicación:

- Región: Áncash
- Provincia: Bolognesi
- Distrito: Colquioc
- Localidades: Colquioc, Chasquitambo, Shinquipampa y Llama
- Zona del proyecto: 18
- Región natural: costa y sierra
- Altitud: Varía entre los 754 y 1215 m s. n. m.
- Longitud: 10.35 km
- Inicio: centro poblado de Chasquitambo (km 0 + 804)
- Fin: localidad de Llama (km 11 + 154)
- Coordenadas este (inicio): 213993
- Coordenadas norte (inicio): 8858714
- Coordenadas este (fin): 221452
- Coordenadas norte (fin): 8860792

Figura 1. *Ubicación de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa*



Población, muestra y muestreo

Población

La población es el camino vecinal Emp. PE-16 (Chasquitambo) de Huayllacayan, ubicado entre los distritos de Colquioc y Huayllacayan, Áncash.

Muestra

La muestra es el tramo de 10.35 km, el cual comprende la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

Muestreo

La elección de la muestra fue realizada mediante la aplicación del muestreo no probabilístico y por conveniencia porque el camino vecinal Emp. PE-16 presenta el mayor tránsito pesado, como consecuencia de los terrenos agrícolas, los cuales constituyen la principal fuente de ingreso de los pobladores de la zona.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas

Las técnicas que se usan son cuatro:

- Estudio de tráfico, canteras y suelos
- Metodología Austroads
- Métodos y procedimientos de ensayos de laboratorio de suelos, de

acuerdo con las normas

- Metodología de estabilización química de suelos

Instrumentos de investigación

Los instrumentos que se emplean son cinco:

- Ensayos de laboratorio
- Fuentes de investigación terciarias y secundarias
- Listas de cotejo
- Notas de campo
- Productos de los programas de Ingeniería: ArcGIS, AutoCAD, Micro-

soft Office y S10 Presupuestos

Métodos y recursos utilizados

Métodos

1. Para el diseño del espesor de afirmado

- Medición del efecto del tránsito en la unidad definida por el AASHTO, por ejemplo, los ejes equivalentes (EE), los cuales se acumulan durante el tipo de diseño (10 años) y se usan en el análisis considerando el tipo de vehículo.

- Categorización de la subrasante existente por cada subtramo o sector homogéneo de acuerdo con el CBR y basándose en la categoría de subrasante establecida por el MTC.

- Determinación del espesor de afirmado basándose en metodología Austroads, el cual vincula la carga actuante sobre el afirmado y el CBR. El espesor se expresa en repeticiones de EE.

2. Para el estudio de canteras

- Evaluación y selección de las canteras de acuerdo con su cantidad (potencia), su calidad y su menor distancia respecto al tramo.

- Registros de perfiles estratigráficos y exploraciones en campo mediante las descripciones manual y visual de las muestras representativas.

3. Para los ensayos en el laboratorio de suelos

- Procedimientos y métodos apropiados para realizar los ensayos de acuerdo con las normas internacionales (AASHTO o ASTM) o las Normas de Ensayos del MTC.

4. Para la obtención de la influencia de los productos químicos

- Metodología de estabilización química de suelos, criterios geotécnicos para la estabilización de suelos y aplicación de las Especificaciones Técnicas Generales promulgadas por el MTC, para carreteras.

- Aplicación de las alternativas de soluciones básicas respecto al tipo de suelo predominante y a la ubicación de la carretera.

- Evaluación del estabilizador químico de suelos según las pautas y las especificaciones técnicas promulgadas por el MTC, para el diseño de soluciones básicas.

Recursos

1. Para la toma de datos de campo

- Cámara fotográfica
- Camioneta doble cabina y doble tracción (4x4)
- Cíncel y comba
- Conos de seguridad

- Formato N.º 01, “Formato de clasificación vehicular” de la oficina de Planeamiento y Presupuesto del MTC

- GPSMAP Garmin 64st (precisión menor a 1 m)

- Lampa y pico

- Lapiceros, costales, entre otros

- Odómetro digital

- Personal en campo

- Pintura esmalte sintético rojo

- Regla metálica milimétrica

- Wincha

2. Para los ensayos de laboratorio

- Equipos de laboratorio de suelos calibrados, que garanticen la validez y la exactitud de los resultados de ensayos

- Personal calificado

Respecto a la bibliografía, se revisaron diversas fuentes de investigación relacionadas con la estabilización de suelos en carreteras no pavimentadas por medio del uso de productos químicos, tales como manuales de carreteras, libros, tesis de grado y posgrado de diferentes universidades, normas nacionales (MTC) e internacionales (AASHTO y ASTM).

Para procesar los datos recogidos en el campo y analizar los resultados de laboratorio se utilizaron diversos recursos, como la computadora portátil, los útiles de escritorio y la impresora. Así también, se emplearon las herramientas de software de la familia AutoDesk (AutoCAD 2020, Civil3D 2018 y AutoCAD); además de Google Earth y ArcGIS 10.1 para obtener la información geográfica, y Excel y Word para crear las hojas de cálculo y redactar la investigación.

Acopio y procesamiento de datos

Acopio de información

El recojo de datos fue realizado mediante la aplicación de diversas actividades efectuadas en el campo y el laboratorio.

1. Toma de datos en campo

- Reconocimiento del área de estudio.
- Levantamiento topográfico del eje de la carretera por medio del uso de GPS submétrico.

- Identificación de las canteras, los centros poblados, los patios de máquina, los depósitos de material excedente, la fuente de agua, las obras de arte, los anchos de superficie de rodadura cada 250 m, entre otros. Se precisa que las progresivas en los tramos tangentes fueron marcadas en el campo cada 20 m y en los tramos curvos, cada 10 m, con el apoyo del odómetro tipo rueda.

- Conteo de tráfico vehicular durante las 24 horas de toda la semana (incluido fin de semana). El conteo inició el viernes 7 del 2020 y terminó el 13 de febrero del mismo año, y fue realizado siguiendo el Formato N.º 01, “Formato de clasificación vehicular”, de la oficina de Planeamiento y Presupuesto del MTC.

- Evaluación y verificación del espesor de la capa existente de afirmado a través de pequeñas prospecciones cada 500 m, y recojo de muestras representativas.

- Estudio de canteras contiguas a la carretera no pavimentada y recolección de muestra de la cantera N.º 01, localizada en el km 12 + 535.

2. Investigación de ensayos de laboratorio

De las prospecciones efectuadas cada 500 m de superficie de rodadura actual

• El acumulado del material de afirmado encontrado en cada 5.175 km de la carretera objeto de estudio fue tomado y analizado a través de diversos ensayos, los cuales se describen en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2. *Ensayos estándar de laboratorio para el material de afirmado existente acumulado por cada 5.175 km de superficie de rodadura*

Ensayos estándar	Normativa	Cantidad
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D-422, MTC E 107	04
Humedad Natural	ASTM D-2216 MTC E 108	04
Límite Líquido Malla N.º 40	ASTM D-4318, MTC E 110	04
Límite Plástico Malla N.º 40	ASTM D-4318, MTC E 111	04
Clasificación SUCS	ASTM D-2487	04
Clasificación de suelos AASHTO	ASTM D-3282, AASHTO M-145	04

Nota. La tabla presenta la totalidad de ensayos estándar efectuados. Dos fueron del km 0 + 804 al km 05 + 979, y otros dos, del km 05 + 979 al km 11 + 154.

Tabla 3. *Ensayos especiales de laboratorio para el material de afirmado existente acumulado por cada 5.175 km de superficie de rodadura*

Ensayos especiales	Normativa	Cantidad
California Bearing Ratio (CBR)	ASTM D-1883, MTC E 132	04
Ensayo de abrasión Los Ángeles	ASTM C-131 MTC E 207	04
Proctor Modificado	ASTM D-1557 MTC E 115	04

Nota. La tabla presenta la totalidad de ensayos estándar efectuados. Dos fueron del km 0 + 804 al km 05 + 979, y otros dos, del km 05 + 979 al km 11 + 154.

b. Del estudio de canteras adyacentes a la carretera no pavimentada.

Para este caso, se tomaron tres muestras representativas (calicatas y trincheras) de la cantera del suelo N.º 1, las cuales fueron analizadas mediante diversos ensayos. Estos ensayos se muestran en la Tabla 4 y la Tabla 5.

Tabla 4. *Ensayos estándar de laboratorio para las muestras representativas de la cantera de suelo N.º 01*

Ensayos estándar	Normativa	Cantidad
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D-422, MTC E 107	03
Humedad Natural	ASTM D-2216 MTC E 108	03
Límite Líquido Malla N.º 40	ASTM D-4318, MTC E 110	03
Límite Plástico Malla N.º 40	ASTM D-4318, MTC E 111	03
Clasificación SUCS	ASTM D-2487	03
Clasificación de suelos AASHTO	ASTM D-3282, AASHTO M-145	03

Nota. En la tabla se presenta la totalidad de ensayos estándar efectuados a partir de las muestras extraídas en dos trincheras y una calicata de la cantera N.º 01 del km 12 + 535.

Tabla 5. *Ensayos especiales de laboratorio para las muestras representativas de la cantera de suelo N.º 01*

Ensayos estándar	Normativa	Cantidad
California Bearing Ratio (CBR)	ASTM D-1883, MTC E 132	03
Ensayo de abrasión Los Ángeles	ASTM C-131 MTC E 207	03
Proctor Modificado	ASTM D-1557 MTC E 115	03

Nota. En la tabla se presenta la totalidad de ensayos estándar efectuados a partir de las muestras extraídas en dos trincheras y una calicata de la cantera N.º 01 del km 12 + 535.

a. Ensayos de laboratorio para las muestras de suelo estabilizado con productos químicos

Para estos ensayos se utilizaron tres estabilizadores químicos: dos polímeros (Megasoil y PolyCom) y un aceite sulfonado (producto Proes100) en conjunto con el aditivo sólido (cemento Portland). Los estabilizadores mencionados fueron aplicados a las muestras conseguidas de la cantera de suelo N.º 01, con la finalidad de determinar la dosificación óptima de cada estabilizador y conseguir la expansión y el CBR.

Tabla 6. Ensayos de laboratorio para muestras de suelo estabilizado con productos químicos

Ensayos estándar	Normativa	Cantidad
California Bearing Ratio (CBR) y control de expansión	ASTM D-1883, MTC E 132 AASHTO T 193	12

Nota. En la tabla se presenta la totalidad de ensayos efectuados. En cada uno de los productos químicos utilizados se aplicaron cuatro dosificaciones.

Procesamiento de datos

1. El procesamiento de la información fue realizado del siguiente modo:
- Elaboración del plano clave de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa mediante el uso del programa AutoCAD Civil 3D.
 - Elaboración del plano de ubicación del depósito de material excedente, las fuentes de agua y la cantera mediante el uso del programa AutoCAD.
 - Estudio de conteo de tráfico mediante el uso del Word y Excel.
 - Realización de los ensayos de los laboratorios especial y estándar para los suelos muestreados.
 - Estudio de canteras y de los suelos de la superficie de rodadura actual mediante el uso de Word.

- Realización de ensayos de laboratorio a las muestras de suelo estabilizado mediante el uso de productos químicos, con el fin de identificar la dosificación óptima de cada uno, además de la expansión y el CBR.

- Elaboración del presupuesto de obra para cada propuesta de suelo estabilizado considerando los productos químicos a emplear (PolyCom, Megasoil y Proes100) mediante el uso del Word, Excel y el Programa S10 Presupuestos2005.

2. Para la medición de la variable dependiente:

Dimensión 1: Diseño

Indicador 1: Subrasante adecuada o estable

En los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio especiales y estándar aplicados a las muestras conseguidas en las prospecciones realizadas por cada 500 m de superficie de rodadura existente, se identificó que el dato más relevante es el CBR de la superficie de rodadura actual, el cual se considera después como subrasante.

Indicador 2: Demanda de tráfico

A partir del estudio de conteo de tráfico en la carretera no pavimentada logró obtenerse el IMDA proyectado y actual para un tiempo de diez años; luego se calcularon los ejes equivalentes proyectados.

Indicador 3: Espesor

Para diseñar el espesor de la capa de suelo estabilizado propuesto para la carretera no pavimentada se utilizó la metodología Austrias.

n. Dimensión 2: Influencia técnica

Indicador 1: Zona

La variación de altitud de la carretera objeto de estudio fue determinada a partir del levantamiento topográfico.

Indicador 2: Plasticidad y análisis granulométrico de suelos

Los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados en las muestras de la cantera de suelo N.º 01 fueron analizados para comprobar que el suelo es apto para la estabilización y la aplicación individual de productos químicos.

Indicador 3: Parámetros máximos y mínimos

Se aplicaron individualmente tres productos químicos al suelo natural considerado apto para usarlo como solución básica; después, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante se hizo la respectiva evaluación de las cuatro dosificaciones, con el objetivo de conseguir la dosificación óptima en la curva: CBR vs. dosificación.

Tabla 7. *Dosificaciones para las alternativas de suelo estabilizado con productos químicos*

Muestra	Materiales	Dosificaciones	
Suelo estabilizado con producto químico con Proes100	Suelo natural + aditivo Líquido Proes100 + aditivo sólido Cemento Portland	Proes 0.27 l/m ³ +	Cemento 35kg/m ³ Cemento 40kg/m ³ Cemento 45kg/m ³ Cemento 50kg/m ³
Suelo estabilizado con producto químico Megasoil	Suelo natural + aditivo sólido Megasoil	0.026 g/kg de material 0.028 g/kg de material 0.030 g/kg de material 0.032 g/kg de material	
Suelo estabilizado con producto químico PolyCom	Suelo natural + aditivo sólido PolyCom	0.026 g/kg de material 0.028 g/kg de material 0.030 g/kg de material 0.032 g/kg de material	

a. Dimensión 3: Influencia económica

Indicador 1: Presupuesto de obra

Elaboración del presupuesto de obra de cada propuesta de suelo estabilizado con productos químicos a partir del uso del programa S10 Presupuestos 2005 y basándose en las cotizaciones de insumos realizadas en un solo mes del año.

Indicador 2: Tiempo de ejecución

Determinación del tiempo para ejecutar las tres propuestas de suelo estabilizado con productos químicos.

Indicador 3: Mantenimiento y monitoreo

Elaboración de las listas de cotejo, a fin de analizar el costo y el tiempo de monitoreo y mantenimiento de cada una de las propuestas, basándose en las recomendaciones del fabricante, el presupuesto de la obra, las normas y los manuales del MTC.

Sistematización del problema general

Para cumplir con los objetivos del estudio, se sistematizó el problema general. Para esto, se desarrollaron los objetivos específicos y se realizaron el análisis y la interpretación de los datos obtenidos por medio de la medicación de la variable dependiente. La sistematización fue realizada del siguiente modo:

Objetivo específico 1

Determinar la calidad del material de la subrasante existente y el espesor de la capa de suelo estabilizado para un periodo de diseño de diez años en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

Dimensión 1: Diseño

Indicadores

Subrasante estable o adecuada, espesor y demanda de tráfico

Índices

$\text{CBR} \geq 6\%$, IMDA (veh/día) , $\text{Nrep EEproyectado} < 300,000$, $e \geq 0.15\text{m}$

Análisis e interpretación de datos

- El resultado del CBR obtenido en los ensayos de laboratorio aplicados a la muestra evidenciaron un valor mayor a 30 % al 95 % de MDS; por ende, se le considera un subrasante estable y adecuado para colocar el suelo estabilizado.

- Para calcular el espesor de la capa del suelo estabilizado, se aplicó el método Austroads, debido a que el valor que posee es menor que 300,000EE.

- El espesor de la capa de suelo estabilizado debe ser igual o mayor que 0.15m, de acuerdo con las normas MTC.

- El cumplimiento de los pasos señalados permite alcanzar el Objetivo Específico 1 y contrastar la hipótesis específica correspondiente.

Objetivo específico 2

Determinar la influencia técnica de los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

Dimensión 2: Influencia técnica

a. Indicadores

Plasticidad, zona, análisis granulométrico de suelos, y parámetros mínimos y máximos.

b. Índices

LL, LP, IP, altitud (msnm), $\text{CBR} \geq 100 \%$, % de distribución de tamaños, $\text{expansión} \leq 0.5 \%$.

c. Análisis e interpretación de datos

- El resultado obtenido a partir de los ensayos de laboratorio aplicados a las muestras de suelo estabilizado con los tres productos químicos (PolyCom, Megasoil y Proes100) permitió verificar si con la dosificación óptima se puede obtener una $\text{expansión} \leq 0.5 \%$ y un $\text{CBR} \geq 100 \%$ para que se les considere soluciones básicas y se apliquen en la carretera no pavimentada objeto de estudio.

- Luego de alcanzar el Objetivo Específico 2, se contrastó la hipótesis específica correspondiente.

Objetivo específico 3

Determinar la influencia económica de los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

Dimensión 3: Influencia económica

d. Indicadores

Tiempo de ejecución, presupuesto de obra, monitoreo y mantenimiento.

e. Índices

Mes, S/. /Km, año

f. Análisis e interpretación de datos

- El costo por kilómetro fue determinado a partir del presupuesto de obra de cada alternativa de suelo estabilizado con productos químicos, para su respectiva ejecución.

- Se identificó la influencia económica que cada producto químico posee.

- Luego de alcanzar el Objetivo Específico 2, se contrastó la hipótesis específica correspondiente.

Análisis e interpretación de resultados

Determinar la calidad del material de la subrasante existente y el espesor de la capa de suelo estabilizado para un periodo de diseño de diez años en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

1. Categorización de la subrasante

Al realizar el estudio en la superficie de rodadura, se identificó que hay un espesor promedio de afirmado de $e = 0.03$ m, el cual fue comprobado por medio de prospecciones con una profundidad variable. Con relación al espesor de la capa de material granular se inició la extracción de las muestras por cada

500 m para su respectiva evaluación, las cuales fueron agrupadas en dos grupos de acuerdo con sus rasgos característicos por cada 5.175 km de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

En los resultados de laboratorio se aprecia que los materiales encontrados y agrupados cumplen con las especificaciones técnicas, por lo cual puede ser empleados como afirmado; sin embargo, su reúso queda descartado porque solo posee un espesor promedio de 0.03 m, lo que quiere decir que forma parte de la rehabilitación realizada en la carretera en 1998; así también se demuestra que se dispone de una subrasante estable y adecuada ($CBR \geq 6\%$), sobre la que puede colocarse la nueva capa de suelo con los productos químicos propuestos.

Tabla 8. Resultados de los ensayos de laboratorio de la plataforma existente

Límites		Clasificación				CBR al 0.1”		
Tramo	Muestra	Abrasión						
	LL	LP	IP	SUCS	AASH-TO	95%	100%	
km 0+804 al ^{M-01}	22.10	16.80	5.30	SM-SC	A-1-b (0)	39.69	55.56	33.62%
km 05+979 ^{M-02}	25.20	18.28	6.92	GC-GM	A-1-b (0)	35.28	52.92	35.20%
km 05+979 ^{M-01} al	26.85	20.31	6.54	SC-SM	A-1-b (0)	34.40	48.15	38.36%
km 11+154 ^{M-02}	25.10	19.68	5.42	GM-GC	A-1-b (0)	42.55	59.57	29.60%

Nota. Los resultados evidencian el cumplimiento de los requisitos de calidad de un material de afirmado

En la Tabla 8 se observa una excelente subrasante ($\text{CBR} \geq 30\%$) respecto al 95 % de MD. Así también, al tener sectores con menos de seis valores de CBR y con características semejantes, se toma el valor promedio para cada tramo. Esto se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. *Resultado del CBR por cada 5.175 km de superficie de rodadura*

Tramo	Muestra	Espesor variable	<u>CBR al 0.1"</u> 95%	CBR subrasante
km 0+804 al km 05+979	M-01	0.02 m 0.05 m	39.69	37.49%
	M-02		35.28	
km 05-979 al km 11+154	M-01	0.02 m 0.03 m	34.40	68.48%
	M-02		42.55	

Los valores de CBR de la Tabla 9 no son tomados en cuenta para la subrasante de diseño porque los suelos para la subrasante de diseño deben tener un espesor de por lo menos de 0.60 m.

2. Número de repeticiones de ejes equivalentes

Para dimensionar el espesor de la capa de suelo estabilizado con productos químicos, fue preciso determinar la carga actuante sobre la superficie de rodadura, la cual se expresa en número de repeticiones de Ejes Equivalentes (EE) y parte del conteo de tráfico.

a. Estación de conteo de tráfico

La Tabla 10 presenta los datos de la Estación E-1 del conteo vehicular

Tabla 10. *Datos de la estación de conteo vehicular*

Código	Estación	Periodo de aforo	Tramo	Ubicación
E1	Chasquitambo	7 días	Chasquitambo-Llampa	Km 0 + 804 km 0 + 804

a. Resultados del conteo vehicular

Respecto al conteo vehicular en la Estación E-1 en Chasquitambo, el resultado conseguido fue corregido por medio del Factor de Corrección estacional de Tunan, pues es el peaje que tiene una cercanía mayor con el tramo objeto de estudio. Por esto, se obtuvo información de la Unidad de Peaje al 2017 del siguiente modo: para vehículos pesados y ligeros es $FC = 1.0665$ y $FC = 1.0585$, respectivamente. Cabe precisar que estos datos corresponden a febrero, mes en el cual se efectuó el conteo vehicular, tal como se aprecia en la Tabla 11:

Tabla 11. *Resultado volumen vehicular diario anual*

Vehículo	IMD	FC	IMDA= IMD x FC	Distribución (%)
Auto	11	1.0585	12	12.00%
Staton Wagon	37	1.0585	39	39.00%
Camioneta Pick Up	15	1.0585	16	16.00%
Camioneta Panel	3	1.0585	3	3.00%
Camioneta Rural	21	1.0585	22	22.00%
Bus 2E	4	1.0665	4	4.00%
Camión 2E	4	1.0665	4	4.00%
Total =			100	100%

a. Tasa de crecimiento y proyección

Por medio de la ecuación que se muestra a continuación, se determinó el tránsito proyectado para el periodo de diseño de diez años, lo cual se evidencia en la Tabla 12.

$$T_n = T_o (1 + r)^{n-1}$$

Tabla 12. Resultado volumen vehicular proyectado para un periodo de diseño de diez años

Vehículo	T2020 (veh./día)	r	n (años)	T2030 (veh./día)
Auto	12	0.59 %	10	13
Staton Wagon	39	0.59 %	10	41
Camioneta Pick Up	16	0.59 %	10	17
Camioneta Panel	3	0.59 %	10	3
Camioneta Rural	22	0.59 %	10	23
Bus 2E	4	1.05 %	10	4
Camión 2E	4	1.05 %	10	4
Total	100			105

En la Tabla 12 se realiza una proyección de la demanda basándose en la tasa de crecimiento de la población para vehículos de pasajeros y en la tasa de crecimiento del PBI por departamento para los vehículos de carga por un lapso de 10 años. La información fue obtenida del INEI, en la que se identificó que la tasa para vehículos ligeros y pesados es $r = 0.59 \%$ y $r = 1.05 \%$, correspondientemente.

a. Cálculo del número de repeticiones de Ejes Equivalentes

Para configurar los ejes de vehículos pesados (camiones y buses) se hizo uso de las relaciones simplificadas promulgadas por el MTC, con el propósito de conseguir su equivalencia a un eje patrón de 8.2 tn. Esto se puede apreciar en la Tabla 13.

Tabla 13. Cargas por eje de vehículos pesados en afirmados

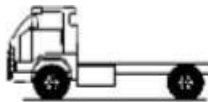
Configuración vehicular	Descripción del vehículo	
C2		
		
	E1	E2

Tabla 14. Cargas por eje para determinar $EE_{8.2tn}$ en afirmados

Ejes	E1	E2
Tipo de eje	Eje simple	Eje Simple
Tipo de rueda	Rueda simple	Rueda doble
Peso máximo (tn)	7	11
Eje equivalente	$EE_{S1} = [P / 6.6]^{4.0}$	$EE_{S2} = [P / 8.2]^{4.0}$
$EE_{8.2tn}$	1.265	3.238

Nota. Los pesos máximos son los emitidos por el Reglamento Nacional de Vehículos

Los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo pesado por día fue determinado por medio de la siguiente ecuación:

$$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times Fd \times Fc \times EE_{8.2 \text{ tn}} \times Fp$$

En la Tabla 15 se presentan los ejes equivalentes:

Tabla 15. Ejes Equivalentes por día para el carril de diseño

Vehículo	IMD_{pi}	Fd	Fc	$EE_{8.2 \text{ tn}}$	Fp	$EE_{\text{día-carril}}$
Bus 2E	4	0.5	1	4.503	1	9.006
Camión 2E	4	0.5	1	4.503	1	9.006
Total	8				$\Sigma =$	18.012

El Factor de crecimiento acumulado (Fca) fue establecido tomando en cuenta la tasa anual de crecimiento para vehículos pesados $r = 1.05\%$. El factor fue calculado con la siguiente ecuación:

$$Factor Fca = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

$$Factor Fca = \frac{(1 + 1.05\%)^{10} - 1}{1.05\%}$$

$$Factor Fca = 10.486$$

En la Tabla 16 se presenta el cálculo del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 tn. El cálculo fue realizado con la siguiente ecuación:

$$N_{rep. \text{ de EE } 8.2 \text{ tn}} = \sum [EE_{\text{día-carril}} \times F_{ca} \times 365]$$

Tabla 16. Resultado número repeticiones de EE de 8.2 tn para un periodo de diseño de diez años

Vehículo	EE _{día-carril}	F _{ca}	Año (días)	N _{rep} de EE _{8.2 tn}
Bus 2E	9.006	10.486	365	34 469.47
Camión 2E	4	1	365	34 469.47
Total	18.012			Σ =68 938.95

Entonces, el tipo de tráfico pesado en EE es T_{NP2} y el N_{rep} de EE_{8.2 tn} es 68 938.95 para un lapso de 10 años en un camino no pavimentado.

3. Espesor de diseño de la solución básica

Para dimensionar el espesor de la capa de suelo con productos químicos, se aplicó el método NAASRA, pues vincula la carga actuante y el CBR de la subrasante.

$$e = [219 - 211x(\log_{10} CBR) + 58(\log_{10} CBR)^2] \times \log_{10} \left(\frac{N_{rep}}{120} \right)$$

Al considerar que la subrasante de la carretera no pavimentada con un de CBR > 6 % hasta > 30 % y un IP < 9 %, obtenido del estudio de suelo, y un tráfico con número de repeticiones igual a 68 938.95, se define que el espesor mínimo es 0.15m para la nueva capa del suelo en la carretera no pavimentada; por otro lado, se descarta la idea de que es necesario poner una capa nivelante sobre la subrasante. Así también, se descartó agregar un recubrimiento bituminoso (colocado por parte de la Solución Básica) porque se muestra que el tráfico pesado no predomina.

Determinar la influencia técnica de los productos químicos Proes100, Megasoil y Polycom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa

1. Cantera de suelo

En el muestreo y la identificación realizados en campo sobre los suelos disponibles en las áreas adyacentes, se escogió una cantera como fuente de materiales porque es factible para estabilizar el suelo con productos químicos

a. Ubicación

La Tabla 17 presenta la ubicación de la cantera de suelo escogida.

Tabla 17. Ubicación de la cantera de suelo N.º 01

Nombre	Tramo	Progresiva	Acceso	Zona
Cantera N.º 1	Chasquitambo-Llampa	km 12+535	Directo, lado izquierdo	Sierra, altitud: 1539 msnm

Nota. La cantera (cerro) no ha sido nombrada, debido a esto, se le colocó un número.

a. Descripción

La cantera de suelo N.º 01 fue escogida porque se demostró que su cantidad y calidad son adecuadas y suficientes para realizar el mantenimiento de la carretera no pavimentada (km 0 + 804 al km 11 + 154).

- Cantera N.º 01 - km 12 + 535
- Área: 4500 m²
- Potencia bruta: 27 000 m³
- Rendimiento: 20 % y 80 % para relleno y afirmado, respectivamente

- Características: de acuerdo con el sistema AASHTO, el suelo ha sido identificado como A-2-4 (0); según el sistema SUCS, como GC. Tiene plasticidad media, 45.7 % de CBR al 100 % de DMS y 35.5 % de CBR al 95 % de DMS, además de una penetración de carga de 0.1”

- Calidad: es apta para que se use como relleno, material de afirmado mejorado y afirmado

- Tratamiento: zarandeo, tamaño máximo 2”

- Periodo de explotación: anual

- Explotación: zaranda estática metálica, tractor de orugas y cargador frontal

- Propietario: comunidad campesina de Colquioc

b. Resultados ensayos de laboratorio

La cantera de suelo N.º 01 fue explorada mediante trincheras y calicatas, con un mínimo de tres prospecciones por cada área menor o igual que una hectárea. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de los ensayos de laboratorio de la cantera de suelo N.º 01

Descripción		Granulometría					Límites de consistencia			HUM (%)	Proctor modificado		CBR 0.1”		Abrasión (%)
Calicata y/o trinchera	Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	SUCS	AASHTO	LL	LP	IP		MDS (g/cm³)	OCH (%)	95%	100%	
C-1	M-1	51.3	36.1	12.6	GC-GM	A-1-a (0)	25	20	5	2.7	2.122	8.4	44.2	54.7	35.1
T-1	M-1	53.9	28.4	17.6	GC	A-2-4 (0)	30	22	8	4.6	2.073	9.9	30.4	40.2	46.1
T-2	M-1	54.1	54.1	12.2	GC	A-2-4 (0)	31	22	9	2.2	2.086	9.8	31.9	42.3	45.8

Nota. Se cumple con los requisitos de calidad de un material de afirmado.

a. Evaluación de la cantera

La Tabla 19 presenta la comparación realizada entre los requisitos de calidad que los materiales deben tener, de acuerdo con los rasgos característicos de la cantera de suelo y las especificaciones técnicas dictadas por el MTC.

Tabla 19. Comparación de los requisitos de calidad para afirmados con las características de la cantera N.º 01

Característica	Especificación técnica en afirmados	Calicata C-1	Trinchera T-1	Trinchera T-2	Observación
Granulometría	Huso granulométrico				Satisfactorio
Límite líquido	35% máx.	25%	30%	31%	Cumple
Índice plástico	Entre 4-9%	5%	8%	9%	Cumple
Abrasión (%)	50% máx.	35.1%	46.1%	45.8%	Cumple
CBR 0.1” (100 % de la MDS)	40% mín.	54.7%	40.2%	42.3%	Cumple

La Tabla 20 presenta la verificación del uso correcto de los productos químicos como soluciones básicas para estabilizar los suelos, de acuerdo con el área donde está situada la cantera (fuente de materiales).

Tabla 20. Verificación de la correcta aplicación de productos químicos como Soluciones Básicas

Característica	Especificación técnica como solución básica	Descripción según la investigación	Observación
Zona	Sierra (altitud entre 500 y 4800 m s. n. m.)	Sierra, altitud: 1539 m s. n. m.	Cumple
Suelo predominante	Suelos granulares, de nula a plasticidad media (Clasificación AASHTO: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5)	Clasificación AASHTO: A-2-4 (0), presenta plasticidad media	Cumple
Estabilizadores de suelos aplicable	• Cemento portland, ceniza volcánica, puzolana. • Emulsión asfáltica • Cal • Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)		Productos químicos: • Aceite sulfonado: Proes100. • Polímeros: Megasoil y polycom Cumple

Cabe precisar que la fuente de materiales cumple con las especificaciones técnicas del MTC, por lo cual se puede aplicar en el suelo escogido sin problemas. La verificación se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. *Verificación del cumplimiento de los requisitos generales del MTC para suelos estabilizados con productos químicos*

Característica	Especificación técnica suelo estabilizado con productos químicos	Descripción según la investigación	Observación
Granulometría	Tipos de suelos: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7	Clasificación AASHTO: A-2-4 (0)	Cumple
Tamaño máximo de agregado	No debe ser mayor a 5cm (2”) o 1/3 del espesor de la capa compactada	Tratamiento con zarado tamaño máximo de 2”	Cumple
Plasticidad	Límite líquido inferior a 40 y un índice plástico cuando menos de 6 pero no superior a 12 %	LL = 28 % e IP =7 %.	Cumple
Abrasión	No mayor al 50 %	Desgaste a la abrasión igual a 42.3 %	Cumple

2. Suelo estabilizado con productos químicos Proes100

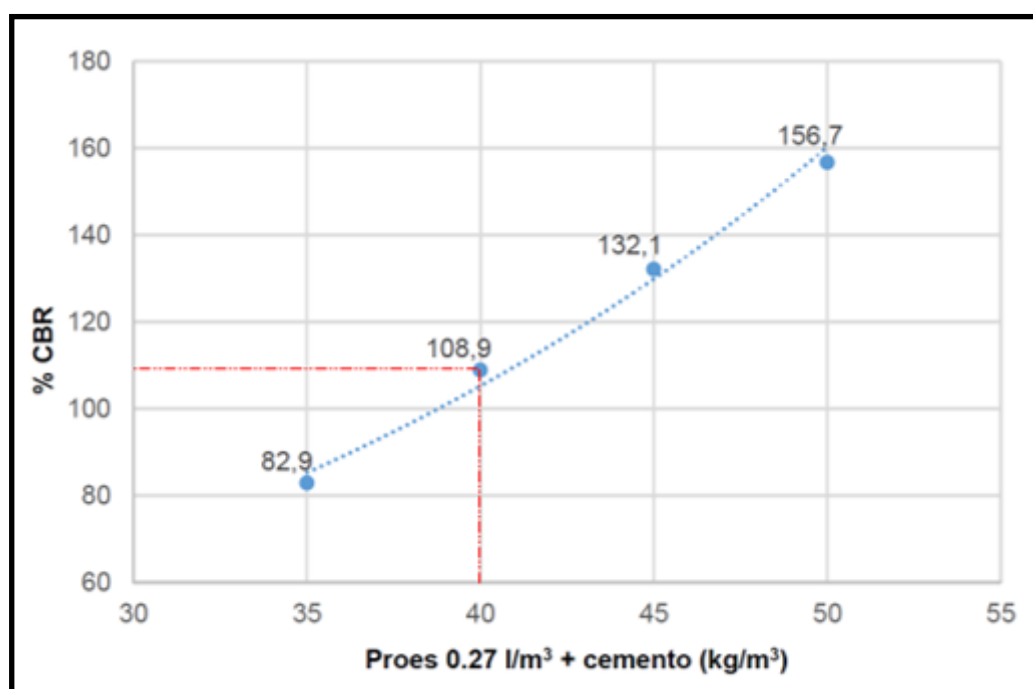
La estabilización de suelos con el producto químico Proes100 demanda una serie de aspectos, tales como un suelo con plasticidad, un aditivo sólido (cemento Portland) y el aditivo líquido Proes100 (aceite sulfonado). Para proceder con la estabilización se verificó el cumplimiento de las consideraciones según las especificaciones técnicas del fabricante. Esto se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22. Verificación y cumplimiento de las consideraciones de uso del producto químico Proes10

Consideraciones para el suelo	Características cantera de suelo N.º 01	Observación
Debe contener partículas arcillosas, $IP > 5$	$IP = 7 \%$	Cumple
Tamaño máximo 2"	Tratamiento con zaradeo, tamaño máximo de 2"	Cumple
Pasante malla N.º4 $\geq 40\%$	Pasante malla N.º 4 = 46.9 %	Cumple
Pasante malla N.º200 $\geq 12\%$	Pasante malla N.º 200 = 14.1%	Cumple

Para obtener una óptima dosificación del producto químico Proes100 y comenzar con la estabilización del suelo de la carretera, se emplearon cuatro dosificaciones diferentes; cada uno de estos tuvieron valores que fueron trazados en la curva CBR vs. Dosificación, como se observa en la Figura 2.

Figura 2. Curva Dosificación vs. CBR del suelo estabilizado con el producto químico Proes100



Nota. Los valores de CBR mostrados son al 100 % de MDS y a 0.1"

Con la Figura 2 y los resultados de los ensayos de laboratorio con el producto Proes100 se obtuvo una dosificación óptima de Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³; así también, se verificó, a nivel de diseño, que los parámetros mínimos y máximos cumplieran como soluciones básicas para las carreteras no pavimentadas, lo cual se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23. Verificación de parámetros máximos y mínimos del suelo estabilizado con el producto químico Proes100

Dosificaciones proes100	CBR a 0.1”		Expansión	Observaciones parámetros
	MDS al 95 %	MDS al 100 %		
Proes 0.27 l/m ³ + cemento 35 kg/m ³	64.3	82.9	No expansivo	No cumple CBR
Proes 0.27 l/m ³ + cemento 40 kg/m ³	81.1	108.9	No expansivo	Cumple
Proes 0.27 l/m ³ + cemento 45 kg/m ³	97.8	132.1	No expansivo	Cumple
Proes 0.27 l/m ³ + cemento 50 kg/m ³	117.4	156.7	No expansivo	Cumple
Parámetros máximos y mínimos: CBR = 100 % mínimo, expansión ≤ 0.5 %				
% de CBR óptimo: 108.9				
Dosificación óptima	Proes 0.27 l/m ³ + cemento Portland 40 kg/m ³			

Nota. Los valores de CBR mostrados se obtuvieron con una MDS de 2.093 g/cm³ y una humedad de 9.4%.

Entonces, al ejecutar el análisis de resultados y los ensayos de laboratorio con el producto Proes100 se identificó que dosificación óptima de Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³ se convierte en una alternativa técnica de solución básica para aplicarlo en la carretera no pavimentada.

3. Suelo estabilizado con productos químicos Megasoil

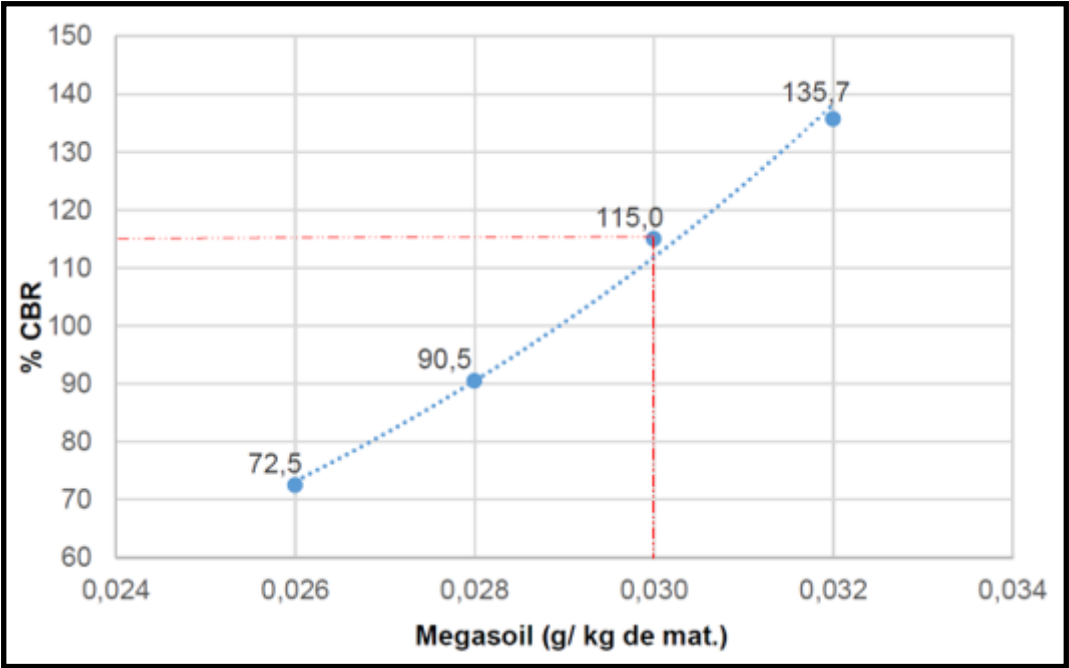
La estabilización de suelos con el producto químico Megasoil demanda una serie de aspectos, tales como un suelo con plasticidad o no plástico, un aditivo sólido (Megasoil) para aglomerar y cohesionar las partículas del suelo. Para proceder con la estabilización se verificó el cumplimiento de las consideraciones según las especificaciones técnicas del fabricante. Esto se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. Verificación y cumplimiento de las consideraciones de uso del producto químico Megasoil

Consideraciones para el suelo	Características cantera de suelo N.º 01	Observación
Suelos plásticos y no plásticos	IP = 7 %	Sin restricciones
Tamaño máximo 2"	Tratamiento con zaradeo, tamaño máximo de 2"	Cumple
Suelos naturales, desde gravas limpias hasta suelos orgánicos altamente expansivos	Clasificación AASHTO: A-2-4(0) y SUCS: GC	Sin restricciones
	Pasante malla N.º 4 = 46.9 %	Sin restricciones
	Pasante malla N.º 200 = 14.1 %	Sin restricciones

Para obtener una óptima dosificación del producto químico Megasoil y comenzar con la estabilización del suelo de la carretera, se emplearon cuatro dosificaciones diferentes; cada uno de estos tuvieron valores que fueron trazados en la curva CBR vs. Dosificación, como se observa en la Figura 3. así también, se verificó, a nivel de diseño, que los parámetros mínimos y máximos cumplieran como soluciones básicas para las carreteras no pavimentadas, lo cual se presenta en la Tabla 25.

Figura 3. Curva Dosificación vs. CBR del suelo estabilizado con el producto químico Megasoil



Nota. Los valores de CBR mostrados son al 100 % de MDS y a 0.1”

Tabla 25. Verificación de parámetros máximos y mínimos del suelo estabilizado con el producto Megasoil

Dosificaciones Megasoil	CBR a 0.1”		Expansión	Observaciones parámetros
	MDS al 95 %	MDS al 100 %		
Megasoil 0.026 g/kg mat	54.8	72.5	No expansivo	No cumple CBR
Megasoil 0.028 g/kg mat	71.1	90.5	No expansivo	No cumple CBR
Megasoil 0.030 g/kg mat	87.7	115.0	No expansivo	Cumple
Megasoil 0.032 g/kg mat	107.9	135.7	No expansivo	Cumple
Parámetros máximos y mínimos:		CBR = 100% mínimo, expansión ≤ 0.5%		
% de CBR óptimo:		115.0		
Dosificación óptima		Megasoil 0.030 g/kg material		

Nota. Los valores de CBR mostrados se obtuvieron con una MDS de 2.093 g/cm³ y una humedad de 9.4 %.

Entonces, al ejecutar el análisis de resultados y los ensayos de laboratorio con el producto Megasoil se identificó que dosificación óptima de Megasoil 0.030 g/kg de material se convierte en una alternativa técnica de solución básica para aplicarlo en la carretera no pavimentada.

4. Suelo estabilizado con productos químicos PolyCom

La estabilización de suelos con el producto químico PolyCom demanda una serie de aspectos, tales como un suelo con plasticidad o de baja plasticidad, un aditivo sólido (PolyCom) para aglomerar y cohesionar las partículas del suelo. Para proceder con la estabilización se verificó el cumplimiento de las consideraciones según las especificaciones técnicas del fabricante. Esto se presenta en la Tabla 26.

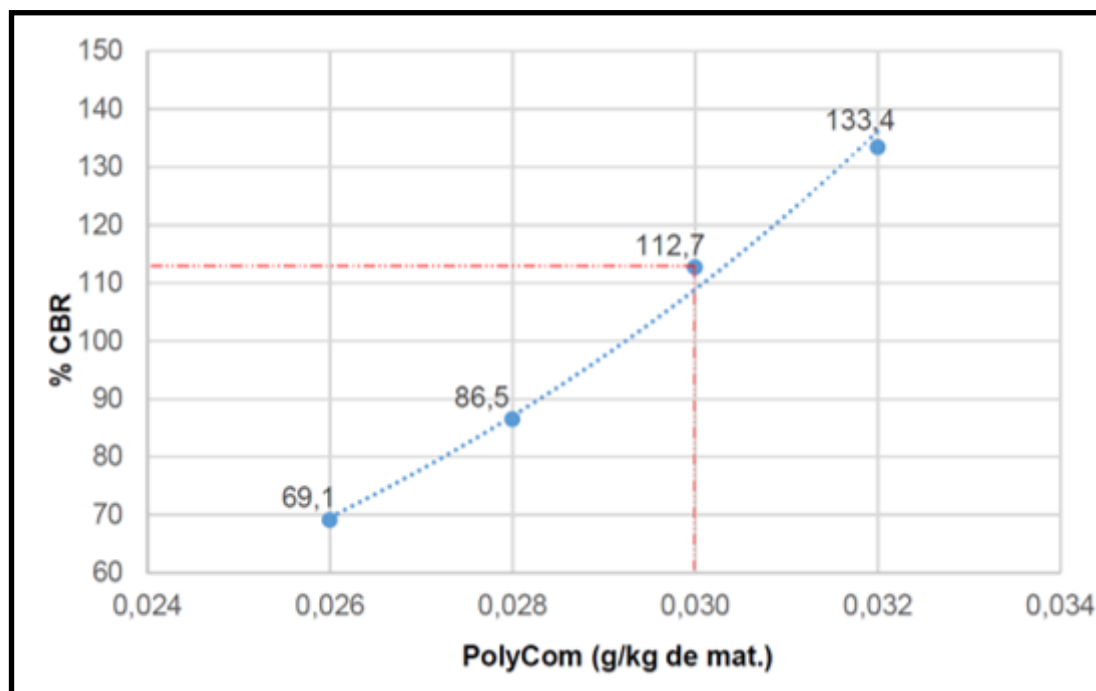
Tabla 26. Verificación y cumplimiento de las consideraciones de uso del producto químico PolyCom

Consideraciones para el suelo	Características cantera de suelo N.º 01	Observación
Predominantemente suelos plásticos hasta de baja plasticidad	IP = 7 %	Cumple
Tamaño máximo 2”	Tratamiento con zaradeo, tamaño máximo de 2”	Cumple
Predominantemente suelos naturales como gravas, arenas y arcillas	Clasificación AASHTO: A-2-4(0) y SUCS: GC	Cumple
	Pasante malla Nº4 = 46.9%	Sin restricciones
	Pasante malla Nº200 = 14.1%	Sin restricciones

Nota. De acuerdo con las investigaciones del fabricante, el estabilizador PolyCom presenta un nivel de efectividad menor en suelos predominantemente limosos

Para obtener una óptima dosificación del producto químico PolyCom y comenzar con la estabilización del suelo de la carretera, se emplearon cuatro dosificaciones diferentes; cada una de estas tuvo valores que fueron trazados en la curva CBR vs. Dosificación, como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Curva Dosificación vs. CBR del suelo estabilizado con el producto químico PolyCom



Nota. Los valores de CBR mostrados son al 100 % de MDS y a 0.1”

Con la Figura 4 y los resultados de los ensayos de laboratorio con el producto PolyCom se obtuvo una dosificación óptima de PolyCom 0.030 kg/m³ de material; así también, se verificó, a nivel de diseño, que los parámetros mínimos y máximos cumplieran como soluciones básicas para las carreteras no pavimentadas, lo cual se presenta en la Tabla 27.

Entonces, al ejecutar el análisis de resultados y los ensayos de laboratorio con el producto PolyCom se identificó que dosificación óptima de PolyCom 0.030 g/kg de material se convierte en una alternativa técnica de solución básica para aplicarlo en la carretera no pavimentada.

Tabla 27. Verificación de parámetros máximos y mínimos del suelo estabilizado con el producto químico PolyCom

Dosificaciones PolyCom	CBR a 0.1"		Expansión	Observaciones parámetros
	MDS al 95 %	MDS al 100 %		
PolyCom 0.026 g/kg mat	52.1	69.1	No expansivo	No cumple CBR
PolyCom 0.028 g/kg mat	66.2	86.5	No expansivo	No cumple CBR
PolyCom 0.030 g/kg mat	84.8	112.7	No expansivo	Cumple
PolyCom 0.032 g/kg mat	101.2	133.4	No expansivo	Cumple
Parámetros máximos y mínimos:		CBR = 100 % mínimo, expansión ≤ 0.5 %		
% de CBR óptimo:		112.7		
Dosificación óptima		PolyCom 0.030 g/kg material		

Nota. Los valores de CBR mostrados se obtuvieron con una MDS de 2.093 g/cm³ y una humedad de 9.4 %.

5. Comparaciones técnicas

Las comparaciones técnicas fueron realizadas en tres aspectos; dos de estos se basaron en la bibliografía y la otra, en los resultados obtenidos. Ahora, los aspectos son los siguientes: procedimiento constructivo, consideraciones de uso de los fabricantes de productos químicos y la influencia técnica de los productos químicos en los suelos estabilizados

La Tabla 28 presenta la comparación realizada entre las consideraciones de uso de los fabricantes de cada producto y las especificaciones técnicas dictadas por el MTC. Cabe precisar que el estabilizador sólido Proes100 es el que posee mayores exigencias en cuanto a la plasticidad y granulometría de los suelos, además de ser el único que exige una dosis de cemento Portland; pese a esto se demuestra que la cantera de suelo N.º 01 cumple todos los requisitos de calidad.

Tabla 28. Comparación de las especificaciones técnicas de suelos estabilizados con productos químicos y las consideraciones de uso de los fabricantes

Características del suelo	EG-2013 (MTC) suelo estabilizado con productos químicos	Especificaciones técnicas del fabricante		
		Estabilizador Proes100	Estabilizador Megasoil	Estabilizador PolyCom
Granulometría	Tipos de suelos: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7	Pasante malla N.º 4 $\geq$ 40 % y pasante malla N.º 200 $\geq$ 12 %.	Suelos naturales, desde gravas limpias hasta suelos orgánicos altamente expansivos	Predominantemente suelos naturales como gravas, arenas y arcillas
Tamaño máximo de agregado	No debe ser mayor a 5cm (2”) o 1/3 del espesor de la capa compactada	Tamaño máximo de 2”	Tamaño máximo de 2”	Tamaño máximo de 2”
Plasticidad	LL<40 y IP cuando menos de 6 pero no superior a 12 %	Debe contener partículas arcillosas IP>5	Aplicable en suelos no plásticos y plásticos	Aplicable en suelos y no plásticos hasta de alta plasticidad
Abrasión	No mayor al 50 %	No específica	No específica	No específica
Otros	-	Requiere dosis de cemento Portland	-	-

La Tabla 29 presenta la comparación realizada del procedimiento constructivo

Tabla 29. Comparación técnica del procedimiento constructivo de la estabilización de suelos con productos químicos en la carretera

Procedimiento constructivo	Suelos estabilizados con producto químicos		
	Proes100	Megasoil	PolyCom
Equipo	Motoniveladora, cisterna, camiones, rodillo vibratorio, tractor s/llantas y de orugas	Motoniveladora, cisterna, camiones, rodillo vibratorio, tractor s/llantas y de orugas	Motoniveladora, cisterna, camiones, rodillo vibratorio, tractor s/llantas y de orugas
Condiciones climáticas	Por lo menos 4 horas del día deben ser superiores a 10 °C y evitar temporadas lluviosas	Sin restricciones	Sin restricciones
Preparación en planta, colocación y compactación	- Mezclar el aditivo sólido con el suelo en acopio. - Diluir el aditivo Proes100 en agua (volumen en función a la Humedad Óptima del suelo) y se puede adicionar a la mezcla en terreno o al despachar los camiones. - Colocar el material en obra, extender, perfilar y compactar en un plazo de 4 horas	- Esparcir homogéneamente el aditivo sólido en el suelo acopiado con la humedad óptima en todo el material. - Mezclar y dejar reposar por lo menos 2 horas, hasta que el producto reaccione con el suelo. - Colocar el material en obra, extender, perfilar y compactar	- Esparcir homogéneamente el aditivo sólido en el suelo en acopio. - Agregar agua para activar el producto (en función a la Humedad Óptima del suelo) y mezclar. - Colocar el material en obra, extender, perfilar y compactar
Cuidado de la estabilización	Curado durante los cuatro días siguientes a la estabilización	No requiere de un curado y el tránsito es operativo de inmediato	No requiere de un curado, es reciclable y el tránsito es operativo de inmediato

Se demuestra que los estabilizadores de suelos Megasoil, Proes100 y PolyCom son alternativas técnicas de soluciones básicas que pueden aplicarse a la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa. En la Tabla 30 se compara la influencia de la técnica en la estabilización de suelos.

Tabla 30. *Comparación de la influencia técnica de la estabilización de suelos con los productos químicos*

Características	Cantera de suelo	Suelos estabilizados con productos químicos		
		Proes100	Megasoil	PolyCom
Dosificación óptima	Natural	Proes 0.27 l/m ³ + cemento Portland 40 kg/m ³	Megasoil 0.030 g/kg de mat.	PolyCom 0.030 g/kg de mat.
Clasificación de suelos	AASHTO: A-2-4(0) y SUCS: GC	AASHTO: A-2-4(0) y SUCS: GC	AASHTO: A-2-4(0) y SUCS: GC	AASHTO: A-2-4(0) y SUCS: GC
CBR a 0.1" y 100 % de MDS	45.7 %	108.9 %	115.0 %	112.7
Expansión	0.3%	No expansivo	No expansivo	No expansivo

Parámetros técnicos máximos y mínimos: CBR = 100 % mínimo, expansión ≤ 0.5%

En los ensayos de laboratorio al suelo natural se determinó un CBR de 45.70 % a un 100 % de MDS; en los suelos estabilizados con la dosificación Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³, Megasoil 0.030 g/kg de material y PolyCom 0.030 g/kg de material, el cual aumentó en 58.03 % el valor del CBR. Con la dosis de Megasoil 0.030 g/kg de material se determinó un CBR de 115.0 % (un 60.26 % más del CBR) y la con la tercera dosificación PolyCom 0.030g/kg de material se consiguió un CBR de 112.7 % (59.45 % más del CBR del suelo natural). La aplicación de los estabilizadores permitió obtener suelos

no expansivos, por lo que se redujo el porcentaje de expansión del suelo natural en un 100%. Al término se obtuvieron los valores de CBR ≥ 100 % porque se cumplieron con los lineamientos decretados por el MTC y se siguieron las recomendaciones de uso de los fabricantes de los estabilizadores.

Determinar la influencia económica de los productos químicos proes100, megasoil y polycom en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa

En este apartado se presentan los presupuestos de la obra para la estabilización de los suelos con la aplicación de los tres productos químicos previamente señalados, los cuales son técnicamente aplicables. En el presupuesto se plantearon las partidas aplicables en una conservación o mantenimiento periódicos de carreteras no pavimentadas con procesos de construcción basados en equipos y métodos convencionales, y rendimientos instituidos en obras viales, los cuales fueron calculados basándose en las distancias medias de transporte de agua. Se precisa que el costo de los materiales ha sido actualizado hasta septiembre del 2021; en este se incluyeron los costos de flete de la ciudad de Lima y la provincia de Barranca.

Considerando lo señalado, se procedió a elaborar el presupuesto de la obra para la estabilización de suelos con los productos químicos que se mencionan a continuación:

1. Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos Proes100

Para elaborar el presupuesto, se precisó la metodología constructiva de mezcla del material granular en acopio/planta con el aditivo sólido (cemento Portland), pues se dispone de una fuente de materiales externa y la metodología que se aplica posibilita el control de la homogeneización. El agua de compactación y el aditivo líquido (aceite sulfonado Proes100) se adicionan en la pista para proceder con el curado en los siguientes cuatro días de estabilización.

El presupuesto del suelo estabilizado se presenta en la Tabla 31.

Tabla 31. *Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos Proes100*

Item	Descripción	Parcial (S/.)
01	Obras preliminares	64,712.79
02	Conservación de calzada	584,271.72
02.01	Perfilado y compactado de subrasante	48,295.77
02.02	Suelo estabilizado con productos químicos Proes100	535,975.95
03	Transporte	57,526.25
04	Drenaje	14,955.30
05	Protección ambiental	6,374.74
06	Emergencia sanitaria	7,576.17
	Costo directo	735,416.97
	Gastos generales (12 %)	88,250.04
	Utilidad (6 %)	44,125.02
	Subtotal	867,792.03
	IGV (18 %)	156,202.57
	Total de presupuesto	1,023,994.60

Para un ancho promedio de 4.01m y por tener como fuente al fabricante del producto, el rendimiento de construcción de la base estabilizada con tecnología Proes se encuentra en un rango de 400 a 500 m por jornada de ocho horas; por tanto, se tomó en cuenta un promedio por jornada de 450 m para un espesor de 0.15 m, y se determinó que el plazo para ejecutar el proyecto asciende a 30 días calendarios.

2. Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos Megasoil

Para elaborar el presupuesto, se precisó la metodología constructiva de mezcla del agua de compactación en acopio/planta con el aditivo sólido (polímero Megasoil), pues se dispone de una fuente de materiales externa y la metodología que se aplica posibilita el control de la homogeneización. Además, por el tiempo de reposo de la mezcla (2 horas) se considera que hay riesgo, por ello se aplicó la constructiva señalada con la finalidad de mantener la humedad óptima de compactación.

Para un ancho promedio de 4.01 m y por tener como fuente al fabricante del producto, el rendimiento de construcción de la base estabilizada con productos químicos Megasoil es de 500 m por una jornada de ocho horas para un espesor de 0.15 m; también se determinó que el plazo para ejecutar el proyecto asciende a 30 días calendarios.

El presupuesto del suelo estabilizado se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32. *Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos Megasoil*

Item	Descripción	Parcial (S/.)
01	Obras preliminares	64,712.79
02	Conservación de calzada	283,724.46
02.01	Perfilado y compactado de subrasante	48,295.77
02.02	Suelo estabilizado con productos químicos Megasoil	235,428.69
	Transporte	57,526.25
03	Drenaje	14,955.30
04	Protección ambiental	6,374.74
05	Emergencia sanitaria	7,576.17
06	Costo directo	434,869.71
	Gastos generales (12 %)	52,184.37
	Utilidad (6 %)	26,092.18
	Subtotal	513,146.26
	IGV (18 %)	92,366.33
	Total de presupuesto	605,512.59

3. Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos PolyCom

Para elaborar el presupuesto, se precisó la metodología constructiva de mezcla del material granular en acopio/planta con el aditivo sólido (polímero PolyCom), pues se dispone de una fuente de materiales externa y la metodología que se aplica posibilita el control de la homogeneización. Se precisa que el producto reacciona con el suelo cuando entra contacto con el agua.

Para un ancho promedio de 4.01m y por tener como fuente al fabricante del producto, el rendimiento de construcción de la base estabilizada con productos químicos PolyCom es de 350 m³ por una jornada de ocho horas para un espesor de 0.15m; también se determinó que el plazo para ejecutar el proyecto asciende a 30 días calendarios.

El presupuesto del suelo estabilizado se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. *Presupuesto suelo estabilizado con productos químicos PolyCom*

Item	Descripción	Parcial (S/.)
01	Obras preliminares	64,712.79
02	Conservación de calzada	871,770.53
02.01	Perfilado y compactado de subrasante	48,295.77
02.02	Suelo estabilizado con productos químicos Polycom	823,474.76
	Transporte	57,526.25
03	Drenaje	14,955.30
04	Protección ambiental	6,374.74
05	Emergencia sanitaria	7,576.17
06	Costo directo	1,022,915.78
	Gastos generales (12 %)	122,749.89
	Utilidad (6 %)	61,374.95
	Subtotal	1,207,040.62
	IGV (18 %)	217,267.31
	Total de presupuesto	1,424,307.93

4. Comparaciones económicas

En la Tabla 34 se comparan los resultados alcanzados basándose en el presupuesto de la obra, los cuales fueron elaborados usando los productos químicos (PolyCom, Megasoil y Prooes100) para estabilizar los suelos en la carretera no pavimentada.

Tabla 34. Comparación de la influencia económica de la estabilización de suelos con los productos químicos

Descripción	Suelos estabilizados con productos químicos		
	Proes100	Megasoil	PolyCom
Costo de conservación de calzada	S/ 584,271.72 (79.45 % del CD)	S/ 283,724.46 (65.24% del CD)	S/ 871,770.53 (85.22% del CD)
Costo directo	S/. 735,416.97	S/. 434,869.71	S/. 1,022,915.78
Total de presupuesto de obra	S/. 1,023,994.60	S/. 605,512.59	S/. 1,424,307.93
Costo kilómetro (S/. / Km)	S/. 98,936.68	S/. 58,503.63	S/. 137,614.29

La Tabla 34 muestra que el presupuesto total del producto Megasoil es S/ 605 512.59 con un costo de S/ 58 503.63/km. Este químico muestra una influencia económica menor que los productos PolyCom y Prooes100, cuyos presupuestos son S/1424 307.93 y S/1 023 994.60 con costos de S/137 614.29/ km y S/98,936.68/km, respectivamente. Por ende, la aplicación del estabilizador Prooes100 supera en 40.87 % al estabilizador más económico y el estabilizador PolyCom genera un costo mayor en 57.49 %.

Por otro lado, indistintamente del estabilizador de suelos, la frecuencia del monitoreo y mantenimiento de las soluciones básicas son realizadas dentro

de las cargas laborales mensuales y el presupuesto anual. El mantenimiento de conservación periódica es realizado cada cuatro años basándose en el presupuesto de obra inicial y el estado de conservación de la superficie de rodadura, con la finalidad de mantener la vía en un estado adecuado y se garantice el tránsito vehicular sin contratiempos.

Contrastación de hipótesis

Contrastación de hipótesis específicas

1. La subrasante existente tendrá un $\text{CBR} \geq 6 \%$ y el espesor de suelo estabilizado para un periodo de diseño de diez años será de 0.15 m, en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

La hipótesis sobre la calidad de la subrasante es aceptada porque en el Estudio de suelos se evidenció la existencia de una capa de afirmado de espesor de 0.03m con un $\text{IP} < 9\%$ y un $\text{CBR} \geq 30 \%$ al 95 % de MDS, lo que se corresponde con la última rehabilitación efectuada en la carretera durante el año 1998. Por tanto, se demuestra que se dispone de una subrasante estable y adecuada ($\text{CBR} \geq 6 \%$) para colocar la nueva capa de suelo estabilizado con productos químicos. No obstante, los valores de $\text{CBR} \geq 30 \%$ deben ser excluidos para la subrasante de diseño. Cabe precisar que esta subrasante no fue categorizada, pues el suelo de la explanación debe tener un espesor mínimo de 0.60 m.

Para concluir, la hipótesis sobre el espesor de 0.15 m para la capa de suelo estabilizado con un periodo de diseño de diez años (Solución Básica) es aceptada, puesto que se la carga actuante sobre la superficie de rodadura fue determinada e identificada como un tipo de tráfico de T_{NP2} con número de repeticiones de 68,938.95 EE. Por ende, se estableció que el espesor mínimo debe ser 0.15 m considerando el Método NAASRA, en el que se sugiere dicho espesor para las carreteras no pavimentadas cuyo rango de tráfico pesado sea de 300,000 EE como máximo.

2. Los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom aumentarán los valores de CBR en un 60 % y reducirán la expansión de suelos en un 100 %, en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

La hipótesis fue aceptada porque se dispone de la cantera de suelo N.º 01, la cual se caracteriza por tener un SUCS de GC, una Clasificación AASHTO de A-2-4 (0), una expansión de 0.3 % y un CBR de 45.70 % a un 100 % de MDS. Entonces, dicha cantera es apta para ser utilizada para el proceso de estabilización de suelos con productos químicos.

En los ensayos de laboratorio de los suelos estabilizados con Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³ se determinó un CBR de 108.90 %, el cual aumentó el CBR del suelo natural en 58.03 %M. Con una dosis de Megasoil 0.030 g/kg de material se obtuvo un 115.0 %, dicho de otro modo, un 60.26 % más del CBR del suelo natural. Con el PolyCom 0.030 g/kg de material se consiguió un CBR de 112.7 %, esto es, 59.45 % más del CBR del suelo natural. Con los tres productos se obtuvieron suelos no expansivos, además de reducir el porcentaje de expansión del suelo natural en 100 %.

Es preciso destacar que los tres productos químicos fueron comprobados y demostraron ser aplicables como soluciones básicas en la carretera no pavimentada, pues cumplieron con las especificaciones del MTC y las consideraciones de uso indicadas por los fabricantes de los estabilizadores.

3. Los productos químicos Proes100 y Polycom superarán en un 50 % el costo de ejecución de obra del producto Megasoil, en la estabilización de suelos de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

La hipótesis fue aceptada porque cumple con las especificaciones del MTC y las consideraciones de uso indicadas por los fabricantes de los productos PolyCom, Megasoil y Proes100. El presupuesto de obra fue elaborado a nivel de conservación y mantenimiento periódicos para las tres alternativas de

estabilización de suelos. Así también se identificó que el presupuesto total del producto Megasoil es S/ 605 512.59 con un costo de S/ 58 503.63/km. Este químico muestra una influencia económica menor que los productos PolyCom y Proes100, cuyos presupuestos son S/1424 307.93 y S/ 1 023 994.60 con costos de S/ 137 614.29/ km y S/98,936.68/km, respectivamente.

Por ende, la aplicación del estabilizador Proes100 supera en 40.87 % al estabilizador más económico y el estabilizador PolyCom genera un costo mayor en 57.49 %. Cabe precisar que los costos de estabilización aumentaron en consecuencia de que el producto PolyCom es importado de Australia y el producto Proes necesita una dosificación de cemento Portland.

Contrastación de hipótesis general

Los productos químicos Proes100, Megasoil y PolyCom incidirán en los valores de CBR en un 60 % y en los de expansión, en un 100 %; en la estabilización de suelos en la Carretera no Pavimentada Chasquitambo-Llampa, Bolognesi, 2019.

La hipótesis fue aceptada porque en los ensayos de laboratorio de los suelos estabilizados con Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³ se determinó un CBR de 58.03 %. Con una dosis de Megasoil 0.030 g/kg de material se obtuvo un 115.0%, dicho de otro modo, un 60.26 % más del CBR del suelo natural. Con el PolyCom 0.030 g/kg de material se consiguió un CBR de 112.7 %, esto es, 59.45 % más del CBR del suelo natural. Con los tres productos se obtuvieron suelos no expansivos, además de reducir el porcentaje de expansión del suelo natural en 100 %.

Por ende, los tres productos químicos influyen en los valores del CBR del suelo natural y los incrementan en 59.25 %, además de reducir la expansión en un 100%. Así también, se cumplen con los parámetros mínimos y máximos de las Especificaciones Técnicas del MTC.

Conclusiones

- Por medio de los ensayos de laboratorio de los suelos estabilizados con las dosificaciones PolyCom 0.030 g/kg de material, Megasoil 0.030 g/kg de material y Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³ se determinó que los productos químicos PolyCom, Megasoil y Proes100 influyen en los valores de CBR del suelo natural, pues los incrementa en 59.25 %, además de reducir el porcentaje de expansión en 100 % en la estabilización de suelos en la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa.

- En el Estudio de suelos de la subrasante existente, se evidenció que existe una capa de afirmado cuyo espesor promedio es de 0.03 m, con un IP < 9 %, y un CBR ≥ 30 % al 95 % de MDS, lo cual se corresponden con la última rehabilitación efectuada en 1998. A partir de esto se determinó que la subrasante es estable y adecuada, además de identificar que el espesor de la capa de suelo estabilizado es de 0.15m para un lapso de 10 años. Esta afirmación fue establecida con base en el Estudio de conteo de tráfico en que se obtuvo un tipo de tráfico pesado T_{NP2} , cuyo número de repeticiones es 68 938.95 ejes equivalentes.

- En el Estudio de canteras, se escogió la fuente de materiales Cantera N.º 01 - km 12 + 535, con clasificación de suelos SUCS GC, IP= 7 %, AASHTO A-2-4 (0), expansión de 0.3 % y CBR de 45.70 % a un 100 % de MDS. Así también, en los ensayos de laboratorio se determinó que los productos químicos influyen en los suelos estabilizados con las dosificaciones: PolyCom 0.030 g/kg de material, Megasoil 0.030 g/kg de material y Proes 0.27 l/m³ + cemento Portland 40 kg/m³, los cuales aumentan en 59.45 %, 60.26 % y 58.03 %, correspondientemente, el valor del CBR del suelo natural y disminuyen el porcentaje de expansión en 100 %.

- Basándose en los presupuestos de obra para la estabilización de suelos con productos químicos a nivel de mantenimiento periódico con aporte de ma-

terial, se determinó que el presupuesto total del producto Megasoil es S/ 605 512.59 con un costo de S/ 58 503.63/km. Este químico muestra una influencia económica menor que los productos PolyCom y Proes100, cuyos presupuestos son S/1424 307.93 y S/ 1 023 994.60 con costos de S/ 137 614.29/ km y S/98,936.68/km, respectivamente.

Recomendaciones

- Para la caracterización de la subrasante de la carretera no pavimentada Chasquitambo-Llampa, realizar el Estudio de suelos de la plataforma partiendo de los perfiles estratigráficos y según los sectores homogéneos. Después, iniciar con el establecimiento del programa de ensayos de CBR al 95 % de la MDS con una penetración de carga de 0.1”, y con la aplicación de un pozo exploratorio o una calicata con un mínimo de 1.50 m de profundidad por km.

- Para obtener la dosificación óptima del suelo estabilizado con productos químicos, se debe usar cuatro dosificaciones diferentes como mínimo, como se efectuó en el estudio. Si se pretende realizar un análisis mayor se sugiere aplicar el CBR y el Ensayo de Proctor Modificado por cada dosificación. Con los resultados que se obtengan proseguir con el trazado de la curva CBR vs. Dosificación con el propósito de realizar una comparación de la dosificación óptima conseguida y generar mayores aportes a la investigación.

- Los presupuestos fueron elaborados a nivel de la superficie de rodadura, además no se evaluó la existencia de la señalización vial en el tramo o viceversa, lo que debe ser considerado para futuras conservaciones o mantenimientos periódicos a fin de plantear soluciones técnicas que tengan una mejor relación con el proyecto.

- Corroborar la calidad de las fuentes de agua propuestas en la evaluación económica con los ensayos de laboratorio, para que sean empleadas de manera adecuada durante el mantenimiento vial de la carretera.

CAPÍTULO V

USO DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE

El uso de productos químicos en el mundo se ha convertido en una actividad preocupante debido a sus consecuencias en el medioambiente, como la desertificación de los suelos, la muerte de especies marinas, la destrucción de la capa de ozono, la lluvia ácida, entre otros fenómenos que solo empeoran la estabilidad del planeta. En este aspecto, los productos químicos se han convertido en una amenaza para el medioambiente y también para la salud de las personas, pues las sustancias que se mezclan con el suelo, aire y agua entran en contacto directo con la población, principalmente, en aquellos individuos dedicados a la agricultura o a la ganadería, quienes obtienen agua del río el regadío de sus plantas, o cuando usan pesticidas, los cuales afectan a sus pulmones.

Por tanto, el uso de productos químicos debe cambiar para garantizar la sostenibilidad del planeta y evitar el deterioro de la salud de la población. Es por ello que se han establecido medidas nacionales, con el objetivo de que las industrias opten por nuevas políticas internas y el desarrollo de productos más amigables con el ecosistema. Así también, se ha promovido la aplicación de la química sostenible o verde, que está diseñada para eliminar o reducir el empleo de sustancias peligrosas o tóxicas usadas para la fabricación de productos, y para reformular los procesos químicos más respetuosos con el medioambiente.

De este modo, con la implementación de productos químicos sostenibles y más seguros, se crea la posibilidad de restaurar el planeta, que ha sido gra-

vemente afectado por el inadecuado uso de químicos y por la falta de medidas que prevención ante los efectos que producen; así también, se abre las puertas a nuevas posibilidades de creación de productos químicos menos tóxicos y a concientizar a las personas sobre la implicancias que estos tienen sobre el ambiente y en la salud de las personas cuando se vierten en los ríos o se usan frecuentemente durante las actividades laborales o domésticas.

5.1. Innovaciones en productos químicos más seguros y sostenibles

La sostenibilidad es un gran reto para las diferentes industrias del mundo, pues algunas de estas se ven obligadas a utilizar productos químicos para realizar sus actividades, pese a que son uno de los impulsores principales de la pérdida de la biodiversidad mundial. El uso de químicos ha causado preocupación en muchos países, debido a los efectos contaminantes provenientes principalmente de la industria química; de ahí que se requiere compromiso por parte de las empresas para investigar alternativas sostenibles.

Al respecto, en los últimos años se han estado elaborando productos y subproductos sostenibles a través de los procesos industriales sostenibles, en los cuales se aplican procedimientos que incluyen el uso de productos y sustancias inocuas que generan menos desechos y residuos, no contaminan el ambiente y garantizan el empleo adecuado y eficiente de los recursos naturales renovables y no renovables. Uno de los recursos que más destaca para la elaboración de productos sostenibles es la pulpa de celulosa. Sin lugar a duda, la reducción del uso de materiales fósiles es importante en la producción industrial, pues garantiza un uso apropiado de la biomasa, la cual no solo es una fuente importante de carburantes, sino también es un recurso que brinda materias primas para las empresas del área de química orgánica (Zambrano-Demera *et al.*, 2020).

En la industria textil, donde también se suelen emplear productos químicos para el proceso de hilatura, se han estado modificando los procesos para adaptarse a prácticas sostenibles y aportar con el cuidado del ambiente. En esta industria, las empresas de moda están implementando políticas de economía circular sobre las materias primas, por ejemplo, las prendas adquiridas en el 2016 provienen de plástico reciclado. En este aspecto, la sostenibilidad se está convirtiendo en el centro de innovación de la industria textil al ser una alternativa que proteger el medioambiente (Rodríguez y Martín-Caro, 2019).

De lo expuesto, se infiere que existen recursos alternativos para que las industrias puedan realizar sus actividades sin dañar el medioambiente, que, en su mayoría provienen de residuos industriales. En este aspecto, las industrias siempre deben estar buscando alternativas que fomenten el cuidado ambiental, con el propósito de no continuar perjudicando el entorno, el cual, cada año, empeora por la cantidad de químicos tóxicos que se vierten en el agua o se propaga al aire.

5.2. Innovaciones y avances tecnológicos en la estabilización de suelos

La estabilización del suelo es un proceso indispensable para la construcción porque mediante esta se mejoran sus cualidades y se reducen los problemas de estructura y pavimentación. En este aspecto, al ser de suma relevancia en el campo de la construcción, las personas encargadas de esta tarea buscan materiales que permitan controlar la estabilidad volumétrica, mejorar la durabilidad y permeabilidad, y aumentar la resistencia del suelo a su cargo. Por este motivo, se han realizado diversos ensayos para identificar los productos más aptos para ser usados en esta labor y garantizar la construcción de la obra. De ahí que destacan dos materiales geosintéticos y el sistema Geoweb, los cuales se detallan a continuación:

Estabilización de suelos con geosintéticos

De acuerdo con Restrepo (2020), un nuevo e innovador concepto en torno a la estabilización y refuerzo de los suelos es a través del uso de geosintéticos, que han demostrado ser útiles para diversas obras geotécnicas, por ejemplo, para las funciones de refuerzo, drenaje, separación de materiales, filtración, entre otros. El uso de geosintéticos es importante en el campo de la construcción porque demuestra ser eficiente y se reduce el uso de recursos naturales, sobre todo, en países donde hay escasez de recursos naturales.

Así también, es un material que reduce costos durante el proceso de estabilización, pues disminuyen los costos de mantenimiento y evitan el rápido deterioro de los suelos o de vías pavimentadas. Cabe precisar que los geosintéticos también son utilizados para los taludes, pues sirven para ser utilizados en la construcción de estructuras para contener el deslizamiento de taludes o evitar otro tipo de catástrofes. Esto se debe a que el geosintético es un polímero que, por sus características, brinda mayor resistencia y estabilización al suelo. Algunos de los geosintéticos más destacables son los siguientes (Ordóñez, 2022):

- **Geodrenes:** Es una red polimérica con características similares a los geotextiles. Se identifica por tener una alta resistencia a la presión, independientemente si la carga soportada es alta o no. El geodren es útil para canalizar las fluctuaciones de agua y para reducir el volumen de las excavaciones de los suelos; además, es económico, lo que permite reducir el costo total de la obra. Los geodrenes son utilizados principalmente cerca de los ríos o mares, o en áreas donde se hacen traslados en el agua constantemente, debido a que soluciona el problema de los suelos blandos al brindarle una mayor firmeza o resistencia.
- **Geoceldas:** se emplean para confinar suelos áridos, incrementar la capacidad portante del terreno y garantizar la estabilidad de los suelos donde prima

el alto tráfico, pues tienen una alta resistencia que evita los desniveles en el suelo.

Sistema Geoweb

Este sistema transforma el relleno por medio del confinamiento, lo cual proporciona resistencia y estabilización al suelo de carreteras o terraplenes empinados. Garzón-Florián sostiene que el sistema Geoweb 3D supera al sistema de geogrillas y geomallas para carreteras porque las características que el sistema posee (Garzón y Henao, 2019):

- Usa relleno local: el sistema Geoweb emplea el relleno disponible en el sitio a diferencia de las geomallas que necesitan un agregado limpio.
- Confinar el relleno: el relleno queda confinado en la estructura 3D del sistema Geoweb, con lo cual se evita la generación de movimiento debajo de la carga.
- Reduce la formación de surcos: las geomallas no protegen la conversión de la superficie, razón por la cual requiere un mayor mantenimiento.
- Disminuye la resistencia de rodadura: el sistema Geoweb brinda protección de profundidad al crear una superficie más firme y estable.
- Aumento de la velocidad de construcción: con el uso del sistema Geoweb se acelera tres veces más el proceso de construcción.
- Usa subrasantes en una sola capa: es suficiente con emplear una sola capa. En cambio, las geomallas requieren hasta tres capas para lograr el mismo beneficio.

Así también, se está optando por la estabilización biológica, que consiste en la plantación de una cubierta vegetal con el fin de evitar la erosión causada por el suelo, el agua y el viento. Cabe destacar que antes de comenzar con la estabilización biológica se deben utilizar previamente otros métodos para garantizar el crecimiento de las semillas y las plantas.

5.3. Nuevos enfoques sostenibles: economía circular y química verde

La economía circular es un paradigma establecido con el propósito de generar prosperidad desde un enfoque que fomenta la reutilización, reducción y reciclaje de productos después de culminado su uso, a fin de darles una segunda oportunidad y generar grandes beneficios a la sociedad al brindarles una segunda vida útil a los productos reciclados, los cuales se convierten en materia prima para que sean aprovechados en la fabricación de nuevos artículos, y se logre reducir la tasa de contaminación ambiental. Para ejemplificar, las alfombras de los automóviles están hechas con polietileno reciclado o botellas (Ortíz-Palomino y Fernández-Bedoya, 2021). En este aspecto, la economía circular no significa solamente reducir la contaminación, sino también concientizar a los fabricantes y a los usuarios para asegurar la sostenibilidad ambiental y evolucionar las ciudades en un mejor lugar para vivir.

La economía circular busca alcanzar tres objetivos fundamentales: eficiencia energética, uso de energías renovables y gestión eficiente y responsable de todo tipo de recursos. Para cumplir estos objetivos, se tiene tres principios (Bohorquez, 2019):

- Principio 1: Mejorar y preservar el capital natural mediante el equilibrio de flujos de los recursos renovables y el control de las reservas finitas, a fin de ofrecer ventajas cualitativas y de forma virtual siempre que la situación lo permita. Al requerir recursos, el sistema circular los selecciona y escoge la tecnología más adecuada para transformarlos y volverlos reutilizables, además garantizar su rendimiento, para que se cumplan todas las condiciones para la generación de nuevos productos.

- Principio 2: Optimizar el empleo de recursos a través de la rotación de materiales, componentes y productos con la máxima utilidad posible, tanto en

el ciclo biológico como técnico. Todo esto con la finalidad de poder repetir el proceso de fabricación, restauración y reciclaje, y lograr que los materiales y componentes puedan volver a recircular.

- Principio 3: Fomentar la eficacia de los sistemas por medio de la detección y eliminación de diseños y factores negativos externos, lo cual incluye evitar posibles daños en la sanidad, la alimentación, la educación, la movilidad, entre otros; así como promover el control de factores externos (vertimiento de sustancia tóxicas) para evitar la contaminación del aire, suelo y agua.

En ese sentido, la economía circular es una alternativa adecuada para preservar el medioambiente en la época actual, pues es un periodo en el que predomina el desequilibrio hombre-naturaleza a nivel nacional y mundial, lo cual exige la implementación de medidas por parte del Estado y de los mismos empresarios con el fin de evitar la alteración del ecosistema, así como la escasez de los recursos renovables y no renovables. Dicho de otro modo, es preciso promover la aplicación de una economía sostenible en todo el mundo, para lo cual es menester desarrollar estrategias innovadoras que generen más tecnologías y métodos eficientes con el objetivo de incrementar la productividad por medio de la reutilización de productos desechados.

La creación de procedimientos con un enfoque de economía circular es una herramienta muy útil para la época actual, en la que los recursos están en peligro de agotarse, principalmente para las industrias químicas y bioquímicas, donde predomina la obsolescencia tecnológica y el bajo o inexistente aprovechamiento de residuos. Ante esta realidad, es necesario diseñar un procedimiento para la empresa química o bioquímica sustentada en el aprovechamiento de materiales locales renovables, tecnologías disponibles y reciclaje y reutilización de productos. Para ello, se recomienda aplicar el siguiente proceso (Wilson *et al.*, 2022):

1. Determinar las características y las actividades socioeconómicas del territorio
2. Identificar la demanda potencial en el territorio
3. Analizar de la tecnología existente, propuesta y evaluación de tecnologías
4. Diagnosticar las capacidades productivas instaladas
5. Identificar el suministro de materias primas y materiales
6. Explotar las capacidades productivas instaladas
7. Optimizar la cadena de suministro
8. Balancear las demandas productivas

Con la aplicación de estos pasos, se intenta proponer un modelo de producción y consumo sostenible y más ecológico, pues supone la reutilización de recursos y la reducción de desperdicios, y de esta manera, reducir las pérdidas económicas e impulsar el cuidado del medioambiente; es decir, con dicho proceso se favorece las ganancias, a la vez que se cuida los ecosistemas, sobre todo, en industrias que usan productos químicos, ya que estas generan un gran daño en el ambiente al alterar la estabilidad ambiental por su nivel de toxicidad.

La química verde o química sostenible es el diseño de procesos y productos químicos para eliminar o reducir el uso o la fabricación de sustancias peligrosas. Se considera que la química verde se aplica a todo el ciclo de vida de un producto químico: diseño, manufactura, uso y eliminación final, y tiene por objetivo ejecutar nuevos procesos químicos para no alterar la composición del medioambiente. Así también, su implementación depende en gran medida de las políticas públicas, pues son las que contribuyen con la protección del medioambiente. En este aspecto, la química verde tiene presente al medioambiente y al ser humano, y apuesta por el establecimiento de una forma innovadora de crear productos químicos no tóxicos y sostenibles (Torres y González, 2022).

Actualmente, Franco y Ordoñez (2020) manifiestan que hay tres tendencias temáticas desarrolladas en torno a la química verde:

Diseños experimentales y aplicación de prototipos en química verde

En esta tendencia se presentan diversas metodologías desarrolladas para mejorar los procesos químicos a nivel productivo o en laboratorio. Se fundamenta en buscar que las sustancias generadas experimentalmente sean más verdes y aporten a los principios de la química verde, por ejemplo, implementar procesos para elaborar aspirina sin productos químicos que dañen el ambiente y con la aplicación de procesos más sustentables.

Química verde, ambiente y sociedad

Desde el ambiente y la sociedad, la química verde se ve permeada por el enfoque CTSA. En este enfoque se intenta proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo a los problemas ambientales que perjudican a localidades, regiones y países; además de concientizar a las personas para que sean más responsables de los cambios ambientales. En este aspecto, en el enfoque CTSA se realiza un pacto entre la naturaleza y la sociedad para garantizar el desarrollo de productos sostenibles.

Química verde en la educación científica

En esta tendencia se observa un vínculo con el ámbito educativo, pues se han desarrollado diferentes prácticas para que los estudiantes desarrollen un sentido responsable y crítico con el ambiente, de tal manera que, cuando comienza su etapa laboral en industrias dedicadas a la fabricación de productos químicos, apliquen su conocimiento desde un enfoque de química verde.

En efecto, la química verde debe ser vista como prioridad mundial y aplicada a todos los sectores industriales porque ayuda a preservar los recursos y ahorrarlos, a la vez que se reduce el impacto ambiental provocado por los químicos y los procesos productivos realizados en las industrias, las cuales, muchas

veces, vierten sustancias tóxicas y perjudican la vida vegetal y animales de la tierra. Ante esta problemática, la química verde tiene la capacidad de crear un entorno más saludable y transformar diversos sectores, tales como la agricultura, química, farmacéutica o manufactureras, que son las que más impacto han tenido en la contaminación del aire, el suelo y el agua.

Por tanto, la química verde actúa como defensora del medioambiente, por lo que es necesario que las entidades adopten este nuevo enfoque para reducir las sustancias químicas que suponen una amenaza planetaria. Finalmente, se precisa la implementación de políticas que apoyen esta medida, a fin de que las industrias continúen fabricando productos químicos sin perjudicar el ecosistema, y la población pueda seguir con sus actividades sin dañar el lugar donde vive y perjudicar su propia salud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bejarano, S. (2022). Incidencia de la erosión en el suelo. *Revista Docencia*, 6, 47-53. <https://revistas.ut.edu.co/index.php/dociencia/article/view/3086>

Bohorquez, C. (10 de septiembre del 2019). *Principios de Economía Circular*. Observatorio de Desarrollo Económico. <https://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/dinamica-economica-industria/principios-de-economia-circular>

Bravo, H. (2019). *Guía para la impermeabilización de cimentaciones mediante drenes y geotextiles para construcciones residenciales en zonas de alto nivel freático* [tesis de licenciatura, Universidad de las Américas]. Repositorio Institucional UDLA. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/11141>

Campos, J. (2019). *Bioprospección y caracterización de productos naturales para el control de Aedes aegypti y Culex quinquefasciatus (Diptera: Culicidae)* [tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Institucional IPN. http://148.204.117.30/jspui/handle/LITER_CIIDIROAX/417

Castillo, B., Ruiz, J., Manrique, M. y Pozo, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú). *Revista Espacios*, 41(10), 11. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n10/a20v41n10p11.pdf>

Chávez-Sifontes, M. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de química*, 115(5), 399-407. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1171>

Chimenos-Küstner, E. y Marques, M. (2019). Hábitos saludables en la prevención primaria del cáncer de cabeza y cuello. En H. Pinho, J. Peixoto y M. Marques (Eds.), *Tratamiento multidisciplinar en pacientes oncológicos* (pp. 58-68). Mídia. <https://www.ccs.ufpb.br/iohc/contents/documentos/books/e-book-intervencao-precoce-no-cancer-oral-um-problema-de-saude-p.pdf#page=58>

Contreras, E., Saez-Huaman, W., Sumarriva-Bustinza, L., Chávez-Sumarriva, N. y Yaulilahua-Huacho, R. (2023). Concentración de metales pesados plomo y arsénico en el botadero de Mollebamba, Huancavelica. *Revista Alfa*, 7(19), 64-71. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.198>

Cruz, L. y Placencia, M. (2019). Caracterización de la intoxicación ocupacional por pesticidas en trabajadores agrícolas atendidos en el Hospital Barranca Cajatambo 2008-2017. *Horizonte Médico (Lima)*, 19(2), 39-48. <https://doi.org/10.24265/horizmed.2019.v19n2.06>

Cusiche, L. y Miranda, G. (2019). Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional 'Lago Junín', Perú. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1433-1447. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870>

De la Cruz, L. y Salcedo, K. (2016). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de aditivos (Eco Road 2000) para pavimentación en Palian-Huancayo-Junín* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio Institucional UPLA. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/112>

De las Heras, B. (2020). Productos naturales: De la medicina tradicional a cabezas de serie para el desarrollo de nuevos fármacos del siglo XXI. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia*, 87(1), 97-104. https://analesranf.com/articulo/8701_05/

Doménech, R. y Pedroche, P. (2019). Reglamento CLP: clasificación, etiquetado y envasado de productos químicos en la Unión Europea. *Revista de Salud Ambiental*, 19(1), 54-61. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/944>

Fertilab. (s/f). *Propiedades fisicoquímicas del suelo y el crecimiento de las plantas*. Fertilab. Recuperado el 18 de junio de 2023, de <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-012-Propiedades-fisicoquimicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas.pdf>

Forde, M., Izurieta, R., Ôrmeci, B., Arellano, M. y Mitchell, K. (2019). Agua y salud. En *Calidad del Agua en las Américas. Riesgos y Oportunidades* (pp. 29-38). IANAS. <https://acortar.link/2BTkvG>

Franco, R. y Ordoñez, L. (2020). El enfoque de química verde en la investigación en didáctica de las ciencias experimentales. Su abordaje en revistas iberoamericanas: 2002-2018. *Educación Química*, 31(1), 84. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.1.70414>

García, C. (2021). *Interacciones tóxicas entre contaminantes ambientales y el hombre*. UNAD. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/notas/article/view/4286>

García, Y., Mendoza, J. y Pérez, C. (2020). Medición de las capacidades de absorción en la industria manufacturera. *Investigación Administrativa*, 49(126), 1-20. <https://doi.org/10.35426/IAv49n126.03>

García-Astillero, A. (30 de abril del 2019). *Qué son los vertidos industriales en el agua y su tratamiento*. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/que-son-los-vertidos-industriales-en-el-agua-y-su-tratamiento-1652.html>

Garzón, J. y Henao, B. (2019). *Estudio de alternativa para la estabilidad de un suelo utilizando materiales reciclables vs. geoceldas convencionales* [trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://hdl.handle.net/10983/24273>

González-Machado, E., Elena-Berro, J. y Cuevas-Rodríguez, C. (2021). *Contaminación hídrica y sus efectos perjudiciales*. Evento Científico AMBIMED 2021. <https://ambimed2021.sld.cu/index.php/ambimed/2021/paper/viewPaper/740>

Grijalva, A., Jiménez, M. y Ponce, H. (2020). Contaminación del agua y aire por agentes químicos. *Recimundo*, 4(4), 79-93. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.79-93](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.79-93)

Grosso, J., Ressia, J., Bongiorno, C. y Mendivil, G. (2022). Caracterización del estado de compactación de un suelo bajo siembra directa utilizando herramientas de geoestadística. *Ciencias Agronómicas*, 34, e004. <https://cienciasagronomicas.unr.edu.ar/index.php/agro/article/view/20>

Grupos PCC. (9 de mayo del 2020). *Industria farmacéutica*. PPC Group. <https://www.products.pcc.eu/es/k/industria-farmaceutica/>

Hernández, O., Ávila, G. y García, S. (2021). Situación actual del recurso suelo en México y la incorporación de abonos orgánicos como estrategia para su conservación. En J. Gasca y H. Hoffmann (Eds.), *Recuperación transformadora de los territorios con equidad y sostenibilidad*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández, Y., López, D. y Moya, F. (2019). Monitoreo ambiental como herramienta para el seguimiento continuo previsto en la evaluación de impacto ambiental. *Revista Espacios*, 40(3), 17. <https://www.revistaespacios.com/a19v40n03/a19v40n03p17.pdf>

Ivette, A. y López, J. (1 de noviembre del 2020). *Consecuencias del impacto ambiental*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/consecuencias-del-impacto-ambiental.html>

Jácome-Macías, G. y Ortiz-Hernández, E. (2022). Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema Consolid. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigació*, 2(10), 2-13.

Jiménez, E., Cardoza, C. y Roque, J. (2021). Análisis socioeconómico y fitosanitario de fincas de producción de chiltoma en Tisma, Masaya, 2019. *Revista Universitaria del Caribe*, 26(1), 87-96. <http://ceimm.uraccan.edu.ni/index.php/Caribe/article/view/930>

Linares, R., Aguilar, M. y Rojas, E. (2020). Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de bolsas de polietileno fundido. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 3(2), 33-40. <https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/612>

López, A., Astroz, A. y Silva, A. (2020). Uso de la tierra y su influencia en la compactación del suelo en el Oriente de Colombia. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 11(1), 34-53. <https://revistas.unillanos.edu.co/index.php/sistemasagroecologicos/article/view/462>

Manzolillo, B. y González, M. (2019). Disposición inadecuada de medicamentos por pacientes o consumidores en su hogar: Una revisión sistemática. *Gaceta Médica Caracas*, 127(2), 108-122. <https://docs.bvsalud.org/bibliore-f/2019/09/1006449/02-manzolillo-b-108-122.pdf>

Martínez-Barrera, G., Martínez-López, M. y Téllez-López, A. (2022). Hidrógeno: tecnologías de producción, almacenamiento y aplicaciones. *CienciAcierta*, 71, 99-128. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/CC71/hidrogenotecnologias.pdf>

Mayora, F. (2019). Contaminación del aire en Monterrey, Nuevo León: interpretación del monitoreo ambiental 2005-2018. *Revista de Investigación*, 43(98), 209-234. <https://www.revistas-historico.upel.edu.ve/index.php/revinvest/article/view/8488>

Mayorga, C., Ruiz, M. y Aldas, D. (2020). Percepciones acerca de la contaminación del aire generada por el transporte urbano en Ambato, Ecuador. *Revista Espacios*, 41(17), 11. <https://ww.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p11.pdf>

Mejía, A., Medina, F., Martínez, S. y Huerta, F. (2019). Manejo de los desechos peligrosos generados por los laboratorios de práctica docente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Babahoyo. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 3(29), 128-139. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol3iss29.2019pp128-139>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2022). *Seguridad química*. Ministerio de Salud y Protección Social.

Ministerio del Ambiente. (2015). *Estudio de desempeño ambiental*. Ministerio del Ambiente. https://www.minam.gob.pe/esda/wp-content/uploads/2016/09/estudio_de-desempeno_ambiental_esda_2016.pdf

Ministerio del Ambiente. (2021). *Fuentes y contaminantes*. Ministerio del Ambiente. <https://infoaireperu.minam.gob.pe/calidad-de-aire/fuentes-y-contaminantes/>

Moreno, A. (2022). Salud y medioambiente. *Revista de la Facultad de Medicina*, 65(3), 8-18. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2022.65.3.02>

Moreno, M., Mancheno, M., Castro, L. y Almendariz, M. (2022). Análisis de impacto ambiental (Batelle Columbus Modicado) “Fábrica de Ladrillos Molinopamba”. *Dominio de las Ciencias*, 8(3), 1. <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/2882>

Muñoz, A. y Morales, M. (2022). *Alternativas para la mitigación de asentamientos diferenciales en el edificio Av. 100 de la ciudad de Bogotá causados por la construcción de edificaciones vecinas* [tesis de licenciatura, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio Institucional UAN. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7117>

Muñoz, E., González, E. y Delgado, D. (2023). La erosividad de la lluvia como factor condicionante de la erosión hídrica en Manabí. *Polo del Conocimiento*, 8(2), 68-81. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/5177>

Murcia, J. (2020). Intervención del riesgo químico mediante el sistema globalmente armonizado en el comercio de sustancias peligrosas. *Cultura del Cuidado Enfermería*, 17(1), 20-31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7818317>

Ondarse, D. (16 de julio del 2021). *Sustancias tóxicas*. Concepto de. <https://concepto.de/sustancias-toxicas/>

Ordóñez, M. (2022). *Alternativas para el mejoramiento de vías terciarias en Putumayo* [trabajo de grado, Universidad de los Andes Colombia]. Repositorio Institucional Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/55495>

Ortíz-Palomino, M. y Fernández-Bedoya, V. (2021). Evidencias de economía circular en Sudamérica. Una revisión sistemática en las bases de datos Scielo y Redalyc, 2018-2020. *Espíritu Emprendedor TES*, 5(3), 13-28. <https://doi.org/10.33970/eetes.v5.n3.2021.269>

Portillo, G. (2020, 16 de abril). *Taludes*. Meteorología en Red. <https://www.meteorologiaenred.com/taludes.html?msclkid=7db013efa7c511ecb49418cc06e9eda0>

Presidencia de la República. (2023, 28 de mayo). *Decreto Legislativo N.º 1570*. Diario Oficial El Peruano. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-legislativo-que-aprueba-la-ley-de-gestion-integral-d-decreto-legislativo-n-1570-2181948-2>

Rasche, J., Gomez, E., Fatecha, D. y Leguizamón, C. (2020). Compactación del suelo y su efecto en el crecimiento vegetativo de soja, maíz y guandú. *Investigación Agraria*, 22(1), 13-21. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.junio.13-21>

Restrepo, J. (2020). Innovación con geosintéticos en el manejo de suelos. *Indagare*, (5), 50-51. <https://revistas.unibague.edu.co/indagare/article/view/86>

Revista Costos. (2021, 22 de junio). *Geosintéticos, Creciente Presencia en Proyectos de Construcción*. Revista Costos. <https://revista-ps.costosperu.com/informe-especial/geosinteticos-creciente-presencia-en-proyectos-de-construccion/>

Rivera, J., Aguirre-Guerrero, A., Mejía, R. y Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 43-67. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Rodríguez, B. y Martín-Caro, E. (2019). Actitudes ante la sostenibilidad y la moda: una exploración por grupos de edad. *adResearch ESIC*, 20(20), 20-35. <https://revistasinvestigacion.esic.edu/adresearch/index.php/adresearch/article/view/128/282>

Torres, E. y González, O. (2022). Química verde y educación superior salvadoreña para un desarrollo sostenible. *Revista Salud y Desarrollo*, 6(2), 68-82. <https://revista.ieproes.edu.sv/index.php/Investiga/article/view/283>

Universidad del Pacífico. (2021, 17 de junio). *La desertificación y sequía: una consecuencia directa en nuestras vidas*. Universidad del Pacífico. <https://ciup.up.edu.pe/analisis/la-desertificacion-y-sequia-una-consecuencia-directa-en-nuestras-vidas/>

Valencia, A. y Riascos, C. (2022). Impacto ambiental por extracción de material en el río Dagua del corregimiento de Zacarías, Buenaventura. En L. De la Rosa y R. Maya, *Ciencias Sociales y Humanas en el desarrollo de la Costa Caribe y Pacífica Colombiana*. UENIC. https://redgysi.com/wp-content/uploads/2022/12/2.-LIBRO-CIENCIAS-SOCIALES-Y-HUMANAS-nov.-15-de-2022_compressed.pdf#page=212

Vargas-Rodríguez, D., Cerón-González, A., Olivares-Martínez, L. y Bobadilla-Ballesteros, M. (2020). *Manual de evaluación de suelos. Énfasis en memoria edáfica, materia orgánica e hidroedafología*. 3.^{er} Concurso mexicano de evaluación de suelos. <https://www.smcsmx.org/files/concurso/2020/Manual-3CMES2020.pdf>

Velasco, E. (2019). La contaminación del aire: un problema de salud pública. *Universitarios Potosinos*, 12-17. <https://acortar.link/FGZzxP>

SOBRE OS AUTORES

Reynaldo Melquiades Reyes Roque

Afiliación: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Correo: rreyesr@unasam.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9408-0069>

Kelly Madeleyne Sáenz Jamanca

Afiliación: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Correo institucional: msaenzj@unasam.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-4547>

Vilma Monteagudo Zamora

Afiliación: Universidad Cesar Vallejo.

Correo: mmonteagudoza@ucvvirtual.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7602-1802>

PRODUCTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS:

EVALUACIÓN DEL IMPACTO
AMBIENTAL Y PRÁCTICAS
SOSTENIBLES



ARCO
EDITORES

www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952