



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL EFECTO DEL
USO DE ADITIVOS QUÍMICOS EN LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS VIALES**

Autor:

Dairo León Vanegas Taborda

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



Evaluación ambiental del efecto del uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos viales

Dairo León Vanegas Taborda

Informe de trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Sanitario.

Asesora:

Gloria María Restrepo Vásquez
Profesora Universidad de Antioquia

Coasesora:

Eliana Patricia Llano Cardona, Ing. Química

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres María Norelba y Guillermo León por su apoyo incondicional, gracias a ellos he podido fortalecerme y salir adelante en todos mis proyectos, que finalmente terminan siendo propósitos colectivos en los que trabajamos juntos.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Guillermo León y María Norelba, a mi hermano Santiago y a mis hermanitas Leydi y Valentina por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de todo este bonito proceso.

Al grupo de Investigación Procesos Fisicoquímicos Aplicados, especialmente a la profesora Gloria Restrepo y a la ingeniera Eliana Llano por sus enseñanzas y guianza en la investigación y elaboración final este trabajo.

Al Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería por el apoyo económico y demás servicios prestados.

A los laboratorios de Química del Agua, Microbiología, Espectrometría y Suelos de la Facultad de Ingeniería por todo el servicio prestado para la realización de diferentes pruebas ambientales.

A la ingeniera Diana Ríos y a la profesora Kelly Patiño por su colaboración en el desarrollo y análisis de pruebas.

A Claire Grangeat por su acompañamiento continuo y apoyo incondicional.

A Cristina Pacífico por sus recomendaciones y valiosas palabras.

A todos los profesores y colaboradores por cada aporte desde sus experiencias académicas y laborales.

Y en general un agradecimiento sincero a la Universidad de Antioquia por acogerme en su Alma Mater y llenarme de nuevas experiencias y conocimientos para mi vida personal y profesional.

Resumen

Las obras de infraestructura tales como caminos, carreteras y similares, proporcionan beneficios sociales y fortalecen las economías regionales. Sin embargo, al utilizar grandes áreas de los territorios y recursos naturales como fuente de materiales, causan en el entorno afectaciones que generan impactos ambientales importantes. Las tecnologías de estabilización química son soluciones alternativas a la pavimentación, mediante las cuales es posible mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos para obtener adecuados desempeños mecánicos. El objetivo de este trabajo fue evaluar a nivel de laboratorio los impactos ambientales generados por el uso de químicos en la estabilización de suelos para aplicaciones viales; asimismo, realizar la caracterización y la evaluación mecánica y ambiental de estos sistemas expuestos a intemperismo acelerado. Se utilizó un suelo arcilloso para su aditivación con siete productos de diferente naturaleza química; se elaboraron probetas cilíndricas con el suelo aditivado y se compactaron bajo las condiciones obtenidas en el ensayo normal de compactación Proctor. Luego se sometieron a intemperismo acelerado empleando una cámara QUV y se realizaron distintas evaluaciones tales como: pruebas de desgaste y análisis de tamaño de partícula para evaluar material particulado; ensayos de compresión no confinada; análisis de ascenso capilar y pruebas ambientales usando cámara de lixiviación en las que se midió pH, Carbono Orgánico Total (COT), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y biodegradabilidad. Los resultados obtenidos evidenciaron que los aditivos empleados como estabilizantes químicos no presentan peligrosidad al ambiente en términos de toxicidad, biodegradabilidad y generación de material particulado; asimismo, se encontraron mejoras en propiedades como permeabilidad y resistencia mecánica respecto al suelo sin aditivar. Este estudio permite concluir que el impacto ambiental generado por los aditivos químicos en aplicaciones de infraestructura vial no es significativo comparado con los procesos constructivos tradicionales y que estas tecnologías son alternativas viables desde perspectivas y enfoques de durabilidad y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: Estabilización de suelos, estabilizantes químicos, impacto ambiental.

Abstract

Infrastructure facilities such as roads or highways provide social benefits and strengthen regional economy. However, the use of land and natural resources, necessary for the construction of these facilities, is causing significant environmental impacts. Chemical stabilization technologies, as alternative to paving, can improve properties of soils in order to obtain adequate mechanical performances. In this study, the objective was to evaluate the environmental impacts of using chemical stabilization for soil road in laboratory conditions; furthermore, to perform the mechanical and environmental characterization and evaluation of these systems, exposed to accelerated weathering. To do that, were developed cylindrical samples of additive soil, in conformity with the Normal Proctor compaction test; seven additives with different chemical composition were used on a clay soil. Thereafter, the samples were processed under accelerated weathering, using a QUV camera and different evaluations were performed: wear tests and particle size analysis to evaluate particulate material; unconfined compression tests; capillary rise analysis and environmental tests using leaching chamber, in which were measured pH, Total Organic Carbon (TOC), Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD) and biodegradability. The results obtained showed that the additives used as chemical stabilizers do not present danger to the environment in terms of toxicity, biodegradability and generation of particulate material; also, improvements were found in properties such as permeability and mechanical resistance in comparison with the soil without additive. This study allows to conclude that the environmental impact generated by chemical additives in road infrastructure applications is not significant compared to traditional construction processes and that these technologies constitute viable alternatives in terms of durability and environmental sustainability.

Keywords: Soil stabilization, chemical stabilizers, environmental impact.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	OBJETIVOS.....	9
2.1.	General.....	9
2.2.	Específicos.....	9
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
4.	JUSTIFICACIÓN.....	11
5.	ANTECEDENTES.....	11
6.	REFERENTES CONCEPTUALES	14
6.1.	Suelo.....	14
6.1.1.	<i>Agentes generadores de suelo.....</i>	<i>15</i>
6.1.2.	<i>Composición de las partículas de suelo.....</i>	<i>16</i>
6.1.3.	<i>Minerales constitutivos de las arcillas.....</i>	<i>17</i>
6.1.4.	<i>Capilaridad en suelos.....</i>	<i>17</i>
6.1.5.	<i>Estabilización de suelos</i>	<i>18</i>
6.1.6.	<i>Estabilización mecánica.....</i>	<i>21</i>
6.1.7.	<i>Estabilización química.....</i>	<i>21</i>
6.2.	Intemperismo natural e intemperismo acelerado	27
6.2.1.	<i>Cámara de Envejecimiento Acelerado QUV.....</i>	<i>27</i>
6.3.	Proctor estándar	28
6.4.	Lixiviación.....	28
6.5.	Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO	29
6.6.	Demanda Química de Oxígeno DQO	29
6.7.	Carbono Orgánico Total COT	30

6.8.	Biodegradabilidad	31
6.9.	Material Particulado	32
6.9.1.	<i>Partículas finas.....</i>	<i>33</i>
6.9.2.	<i>Partículas gruesas</i>	<i>33</i>
6.9.3.	<i>Partículas Suspendingas Totales</i>	<i>33</i>
6.9.4.	<i>Tipología de las fuentes de emisión de partículas.....</i>	<i>33</i>
6.9.5.	<i>Distribución de tamaño de partícula</i>	<i>34</i>
6.10.	Evaluación de impacto ambiental.....	36
6.10.1.	<i>Evaluación de impacto ambiental en Colombia.....</i>	<i>37</i>
7.	METODOLOGÍA	38
7.1.	Materiales.....	39
7.1.1.	<i>Suelo de estudio.....</i>	<i>39</i>
7.1.2.	<i>Aditivos químicos utilizados.....</i>	<i>39</i>
7.2.	Métodos	42
7.2.1.	<i>Ensayo de proctor estándar</i>	<i>42</i>
7.2.2.	<i>Compactación de muestras</i>	<i>43</i>
7.2.3.	<i>Compresión Inconfinada en muestras de suelo</i>	<i>43</i>
7.2.4.	<i>Prueba de Envejecimiento Acelerado.....</i>	<i>43</i>
7.2.5.	<i>Práctica estándar para la extracción de residuos sólidos con agua.....</i>	<i>44</i>
7.2.6.	<i>Potencial de hidrógeno (pH).....</i>	<i>45</i>
7.2.7.	<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>45</i>
7.2.8.	<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....</i>	<i>45</i>
7.2.9.	<i>Carbono Orgánico Total (COT)</i>	<i>45</i>
7.2.10.	<i>Biodegradabilidad</i>	<i>46</i>
7.2.11.	<i>Prueba de Desgaste</i>	<i>46</i>

7.2.12. <i>Composición Química</i>	46
7.2.13. <i>Análisis de Tamaño de Partícula (ATP)</i>	47
7.2.14. <i>Prueba de Ascenso Capilar</i>	47
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
8.1. Caracterización del suelo	47
8.1.1. <i>Lugar de extracción del suelo de estudio</i>	47
8.2. Proctor Estándar	49
8.3. Compresión Inconfinada	51
8.4. Potencial de hidrógeno (pH)	53
8.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	53
8.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	55
8.7. Carbono Orgánico Total (COT)	56
8.8. Biodegradabilidad	57
8.9. Prueba de Desgaste	58
8.10. Composición Química	59
8.11. Análisis de Tamaño de Partícula (ATP)	62
8.12. Ascenso Capilar	63
9. CONCLUSIONES	66

Lista de tablas

Tabla 1. Método recomendado de estabilización según tipo de suelo.	19
Tabla 2. Método recomendado de estabilización de acuerdo al propósito deseado y tipo de suelo.	20
Tabla 3. Resultados de ensayos de caracterización realizados al suelo natural.	48
Tabla 4. Densidad seca máxima y humedad óptima para cada probeta estabilizada químicamente.	50
Tabla 5. Resultados de pH para cada muestra sometida a diferentes tiempos de intemperismo.	53
Tabla 6. Resultados de COT para cada una de las muestras lixiviadas después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.	56
Tabla 7. Resultados de biodegradabilidad para cada una de las muestras lixiviadas después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.	58
Tabla 8. Diámetros de partícula y área superficial para cada sistema aditivado.	62

Lista de imágenes

Imagen 1. Cámara QUV de envejecimiento acelerado.	28
Imagen 2. Cámara de lixiviación.	44
Imagen 3. Ubicación de la extracción del suelo de estudio.	48

Lista de graficas

Gráfica 1. Relación entre el peso unitario seco y la humedad para la muestra de suelo sin estabilizar.	51
Gráfica 2. Resistencia a la compresión para el suelo natural y estabilizado sometido a diferentes tiempos de intemperismo.	52
Gráfica 3. Resultados de DQO para cada muestra lixiviadaa después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.	55
Gráfica 4. Resultados de DBO para cada una de las muestras lixiviadas después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.	55
Gráfica 5. Contenido de materia orgánica por ignición.	57
Gráfica 6. Masa de desgaste para cada probeta estabilizada.	59

Gráfica 7. Composición química del suelo natural y estabilizado.	61
Gráfica 8. Composición química del suelo natural y estabilizado.	61
Gráfica 9. Composición química del suelo natural y estabilizado.	61
Gráfica 10. Tiempo total de saturación para cada probeta estabilizada.	64
Gráfica 11. Velocidad de ascenso capilar para cada probeta estabilizada.	64
Gráfica 12. Caudal de saturación para cada probeta estabilizada.	65
Gráfica 13. Masa de suelo desprendido para cada suelo estabilizado.	65
Gráfica 14. Porcentaje de hinchamiento para cada sistema aditivado.	66

Lista de figuras

Figura 1. Clasificación de las fuentes de material particulado de origen antrópico.	34
Figura 2. Distribución típica del tamaño de partículas encontradas en la atmosfera. El polvo fugitivo es dominante en esta distribución.	35

1. Introducción

La problemática de los caminos naturales no estabilizados se puede resumir en unos pocos factores críticos, tales como la necesidad de mantenimiento frecuente e intensivo, la reposición de agregados para compensar pérdidas de material y la compactación y restauración morfológica del camino (eliminar huellas, abovedar para permitir drenaje de agua, etc.). La evidencia práctica confirma que un camino no pavimentado, adecuadamente estabilizado satisface mejor y durante más tiempo las demandas de tráfico, que un camino natural sin mejoras (López & Ambrosini, 2013). Es de este modo como surgen tecnologías alternativas para la construcción de vías de transporte, siendo la estabilización química una opción factible, por razones económicas, estéticas y operativas. Esta alternativa altera química y físicamente el suelo y, por ende, trae consigo un impacto medioambiental, así como ocurre en las infraestructuras desarrolladas con productos tradicionales. Sin embargo, se cree que el impacto generado en la estabilización química es mucho menor al que podría generarse con el asfalto, por ejemplo, como materia prima para la construcción de una carretera pavimentada.

La estabilización química de suelos se ha implementado con diferentes propósitos. Uno de los más estudiados está relacionado directamente con las infraestructuras viales, donde normalmente se adicionan productos químicos con propiedades estabilizadoras. En esta técnica de estabilización se generan interacciones entre los aditivos y la matriz del suelo, a modo de promover distintos efectos tales como ligar las partículas del terreno, retener la humedad para reducir la emisión de polvo, regular procesos de adsorción–desorción de humedad, que provocan la expansividad de los suelos arcillosos mediante efectos iónicos, como la reversión de la carga electrostática, promover la surfactantes para mejorar la dispersión de los aditivos en el suelo, a través de mecanismos como la reducción de la tensión superficial (López & Ambrosini, 2013).

Además de la estabilización química de suelos también se han implementado múltiples técnicas de estabilización mecánica, donde su objetivo principal es lograr un material con mayor densidad mediante la mezcla y compactación de dos o más suelos y/o agregados. También se ha utilizado la bioingeniería con miras a la estabilización de suelos, donde se utiliza la vegetación y algunos materiales inertes como elementos estructurales en construcciones bastante simples. Sin embargo, en este trabajo se hará énfasis en la estabilización química de suelos, donde el objetivo principal es justamente evaluar los impactos ambientales generados por el uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos viales.

Este trabajo se desarrolla a escala de laboratorio, utilizando como base un suelo arcilloso proveniente del municipio de Valencia, Córdoba. Inicialmente se hace una caracterización fisicoquímica del suelo de estudio y los respectivos aditivos (Cemento, Cal, Zeolita , Aceite sulfonado, Enzima, Polímero, Organosilano) Seguidamente se aditiva el suelo y se realizan probetas con base en el ensayo del proctor estándar. Finalmente se evalúa el desempeño de los diferentes sistemas aditivados con base en diferentes ensayos; tales como durabilidad mediante envejecimiento acelerado en cámara QUV, pruebas de desgaste, ensayos de ascenso capilar, pruebas de resistencia mecánica, análisis de tamaño de partícula, composición por XRF del material particulado y pruebas ambientales (DQO, DBO, COT) después del proceso de lixiviación.

2. Objetivos

2.1. General

Evaluar a nivel de laboratorio los impactos ambientales del uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos para usos viales.

2.2. Específicos

Realizar la caracterización fisicoquímica del suelo y de los aditivos que serán empleados como estabilizantes.

Realizar la caracterización fisicoquímica y mecánica de los sistemas aditivados.

Caracterizar y evaluar los sistemas aditivados bajo condiciones de intemperismo acelerado en términos de propiedades fisicoquímicas y mecánicas.

Realizar evaluación ambiental de los sistemas aditivados mediante ensayos en cámara de lixiviación y pruebas de desgaste.

Determinar la velocidad de ascenso capilar de los sistemas aditivados para evaluar los efectos que sobre este parámetro tienen los aditivos incorporados.

Analizar los resultados obtenidos en función de la generación de contaminantes y material particulado para establecer el nivel de los posibles impactos ambientales.

3. Planteamiento del problema

El desarrollo de un país está asociado al estado de su infraestructura vial, factor potenciador de la conectividad nacional e integración interregional; y diferenciador de la competitividad en bienes y servicios de los distintos sectores que integran su dinámica socio-económica.

Las obras de infraestructura tales como caminos, carreteras y similares, proporcionan beneficios sociales y económicos representados en menores costos de transporte, mayor acceso a educación, atención médica, a los mercados para los cultivos y productos locales, así como el fortalecimiento de las economías regionales. Sin embargo, estas obras al utilizar grandes áreas de los territorios causan en el entorno afectaciones que generan impactos ambientales importantes.

Una de las limitaciones que enfrenta el desarrollo de la infraestructura vial es el constante deterioro de los recursos naturales que son la principal fuente de materiales; su explotación y uso irracional han provocado escasez por el agotamiento progresivo de este recurso. Por ello, surgen soluciones alternativas como la estabilización química de suelos, que mediante la transformación fisicoquímica de materiales, puede mejorar propiedades de resistencia mecánica y de desempeño que resulten eficientes ante condiciones climáticas y de tránsito propias de cada región.

El interés que ha surgido en los últimos años por la estabilización química de suelos, se evidencia en el creciente número de investigaciones en este tema; en la proliferación de tecnologías y productos químicos comerciales y en su inclusión en proyectos para la construcción de carreteras.

En general, la investigación en el campo de la estabilización química de suelos ha estado orientada a evaluar el desempeño de los distintos tipos de productos en términos de resistencia mecánica alcanzada por el suelo aditivado, en función además de la tipología del suelo objeto de estudio. Las evaluaciones de los posibles impactos ambientales generados por el empleo de estas tecnologías en proyectos de infraestructura vial no han sido el foco central o el objeto de las investigaciones en este campo.

Entre otros factores que afectan el medio ambiente en el desarrollo de un proyecto para la construcción de infraestructura vial, se encuentran los relacionados con la generación de residuos potencialmente contaminantes. En el caso particular de intervenciones para el mejoramiento del suelo mediante procesos de estabilización química, se hace necesario evaluar el efecto de la incorporación de productos químicos al suelo con el objetivo de establecer la generación de impactos ambientales

Es así como en este trabajo se propone realizar la caracterización ambiental a nivel de laboratorio de la estabilización de suelos para usos viales, empleando diferentes aditivos químicos comerciales.

4. Justificación

La estabilización química de suelos se ha venido implementando como una estrategia para el mejoramiento de suelos viales, donde se realizan generalmente estudios del comportamiento mecánico, excluyendo de algún modo los posibles efectos en el aire, en aguas superficiales o subterráneas y en el mismo suelo. En esta investigación también se presentan algunos estudios mecánicos con resultados positivos en cuanto a los parámetros que los caracterizan, sin embargo el foco de la investigación parte de una dinámica ambiental y crítica con respecto a los productos químicos utilizados.

Muchos de los procesos de estabilización que se realizan son con base en la experimentación y apenas están incursionando en el campo, siendo esta una de las razones por las que se deberían realizar estudios de impacto ambiental, lo cual no quiere decir que para las estabilizaciones convencionales no se deban realizar seguimientos de las variables físicas, químicas y biológicas que determinan el estado de la zona intervenida, aunque se hayan demostrado en otros estudios que los impactos ambientales son mínimos o nulos. Esto se justifica en la variabilidad del terreno, su composición química, su topografía, hidrología, el uso de suelo a los alrededores del tramo intervenido, entre otras características que podrían influir en la variabilidad de ciertos parámetros con respecto al aditivo químico utilizado.

De esta manera, se desarrolló un trabajo de investigación que proporciona elementos base para estudios posteriores, teniendo igualmente como propósito sensibilizar a los usuarios e investigadores en aspectos ambientales relacionados con la construcción de infraestructura vial.

5. Antecedentes

El impacto de un proyecto sobre el medioambiente, es la diferencia existente entre la situación del medio ambiente modificado a causa de un proyecto ejecutado, y la situación del medio ambiente futuro tal y como este habría evolucionado sin la realización del mismo (Conesa, 1997). Los proyectos de vialidad, al igual que pueden generar efectos positivos en la socio economía de una región, pueden también tener alteraciones significativas que causan impactos ambientales en

la zona. En este sentido, la construcción, además de ser indispensable para el desarrollo de la sociedad, es también uno de los principales responsables de la generación de residuos, contaminación, transformación del entorno y uso considerable de energía (Agudelo et al., 2012). En términos estadísticos, se puede decir que el sector de la construcción es responsable del 50% de los recursos naturales empleados, del 40% de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) y del 50% del total de los residuos generados (Anink et al., 1996).

Hasta hace pocos años, los estudios de factibilidad para la construcción de una obra vial, sólo se centraban en los efectos sociales y económicos, sin tener en cuenta la conservación del medio ambiente. Actualmente, el impacto ambiental generado en una obra de infraestructura, es un factor importante de análisis (Martínez, 2014). De acuerdo con otras investigaciones realizadas en este tema, se puede concluir que era poco o casi nulo el control sobre la afectación y los daños ambientales, pues no se tienen datos ni estadísticas de la afectación al entorno ambiental por obras de infraestructura (Thompson, 2014).

La aparición de nuevos materiales ecológicos, nuevas metodologías de construcción, herramientas de valoración ambiental, normatividades para la reglamentación de la sostenibilidad en el sector de la construcción, ejemplifican la viabilidad de la aplicación de lineamientos de la sostenibilidad en la industria de la construcción, de tal forma que en la práctica la conservación del medio ambiente tenga un rol más activo desde la toma de decisiones y las herramientas para generar políticas al respecto (Agudelo et al., 2012).

En el caso particular del empleo de tecnologías como la estabilización química de suelos para ser aplicada en proyectos viales, los estudios han estado orientados a evaluar el desempeño de los distintos tipos de productos en términos de resistencia mecánica alcanzada por el suelo aditivado, en función además de la tipología del suelo objeto de estudio.

Rocha y Rezende realizaron un estudio en el que evaluaron un suelo tropical granular estabilizado químicamente con cal y cemento con fines de pavimentación. La evaluación se basó principalmente en parámetros relacionados con la mecánica del suelo (Rocha & Rezende, 2017).

Ghadir y Ranbjar estudiaron compuestos como geopolímeros y cemento como estabilizantes de suelos, comparando el rendimiento mecánico de la estabilización de suelos arcillosos utilizando un geopolímero a base de ceniza volcánica y cemento Portland ordinario. En este trabajo se determinaron los efectos del tiempo y las condiciones de curado, así como las dosificaciones de los componentes del sistema (Ghadir & Ranjbar, 2018).

Correia y Rasteiro utilizaron nanotubos de carbono de múltiples paredes para la estabilización química de un suelo en Portugal, donde evaluaron su aplicabilidad en términos de la calidad de la dispersión de la suspensión y del comportamiento mecánico del nuevo material compuesto. Para este propósito utilizaron dos surfactantes con diferente peso molecular y carga (Correia & Rasteiro, 2016).

El uso de enzimas también ha sido una alternativa en la estabilización de suelos para usos viales. En la India, por ejemplo, Kushwaha y colaboradores realizaron una investigación sobre los efectos de la estabilización de un suelo expansivo, que tiene propiedades geotécnicas deficientes, con la enzima Eko Soil (ES), para encontrar su aplicación en la construcción de terraplenes en carreteras. Finalmente concluyeron que la estabilización del suelo expansivo con el ES hizo que el suelo tuviera mayor prestación al disminuir su plasticidad y aumentar su resistencia (Kushwaha et al., 2018).

Por otro lado, Soltani y colaboradores, desarrollaron una serie de experimentos en los que evaluaron la eficiencia de un aceite sulfonado, fabricado comercialmente, sobre un suelo altamente expansivo. Dentro de la experimentación se incluyó un medidor de carga de hinchamiento, se midió resistencia a la compresión no confinada y se realizaron pruebas de secado y humectación cíclica. Los resultados obtenidos mostraron cambios en el comportamiento mecánico del suelo, mediante mejoras logradas en las características de hinchamiento y resistencia (Soltani et al., 2017).

En Colombia, Jerez y colaboradores realizaron un estudio detallado del desempeño de un organosilano como estabilizante químico de un suelo laterítico evaluando propiedades como capacidad portante, densidad y permeabilidad (Jerez et al., 2018).

Además de la estabilización química de suelos también se han implementado múltiples técnicas de estabilización mecánica, cuyo objetivo principal es lograr un material con mayor densidad mediante la mezcla y compactación de dos o más suelos y/o agregados. La turba, por ejemplo, es un tipo de suelo sobre el que normalmente se realizan estabilizaciones mecánicas cuando se pretenden construir estructuras sobre ella. Esto se debe a sus propiedades geotécnicas negativas; tales como baja resistencia al corte, alto coeficiente de permeabilidad, fácil compresibilidad, entre otros. Sin embargo, el foco de este trabajo será la estabilización química.

Dentro de la bioingeniería también se han utilizado un conjunto de acciones donde se utilizan materiales de construcción como plantas y estacas, así como materiales inertes, como

elementos estructurales en construcciones muy simples, con miras a la recuperación ecológica y a la estabilización de los suelos. Sutili y colaboradores han realizado estudios de este tipo aplicando la bioingeniería. En uno de sus trabajos utilizaron algunas especies vegetales, donde muestran el resultado de una secuencia de experimentos realizados con el objetivo de identificar, entre especies de hábitat ripario, aquellas con capacidad de propagación y desarrollo vegetativo como una alternativa a la estabilización natural de cierto tipo de suelos (Sutili et al., 2018).

El análisis del estado del arte, en general, muestra que las evaluaciones de los posibles impactos ambientales generados por el empleo de estas tecnologías en proyectos de infraestructura vial no han sido el foco central o el objeto de las investigaciones en este campo.

6. Referentes conceptuales

6.1. Suelo

Se dice comúnmente que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal (Eulalio Juárez & Rico Rodríguez, 1975).

La interpretación del concepto del suelo varía de acuerdo a los intereses del investigador. Para el agrónomo, por ejemplo, la palabra se aplica a la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal, siendo esta interpretación demasiado restringida para el ingeniero. Por otro lado, dando un ejemplo más, para el geólogo es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie; esta definición peca parcialmente en ingeniería, al no tomar en cuenta los materiales transportados no intemperizados posteriormente a su transporte (Eulalio Juárez & Rico Rodríguez, 1975).

Las partículas de suelo son sólidas y no se pueden mover con la misma facilidad que los elementos de un fluido. Así pues, el suelo es intrínsecamente un sistema de partículas. Los espacios entre las partículas de suelo se denominan vacíos, huecos, poros o intersticios. Estos poros suelen estar ocupados por aire y/o agua, con o sin materiales disueltos. El suelo está formado entonces por una fase mineral y una fase fluida o fluido intersticial. Los elementos de la fase intersticial influyen en la naturaleza de las superficies minerales, por tanto, afectan a los procesos de transmisión de las fuerzas en los puntos de contacto entre partículas. Esta interacción entre fases se denomina interacción química. La naturaleza del fluido intersticial tiene influencia sobre la

magnitud de la resistencia al deslizamiento entre dos partículas, dada la naturaleza química de la superficie de contacto. De hecho, en el caso de partículas de suelo muy delgadas, el fluido intersticial puede penetrar completamente entre las partículas. Aunque estas partículas ya no están en contacto en el sentido usual, aún permanecen muy juntas y pueden transmitir fuerzas normales y posiblemente también tangenciales. La separación entre estas partículas aumentará o disminuirá, según lo hagan las fuerzas de compresión transmitidas, siendo entonces una causa de la deformación general de la masa de suelo (Lambe & Whitman, 2008).

6.1.1. Agentes generadores de suelo

La corteza terrestre atacada principalmente por el aire y las aguas, siendo los medios de acción de estas sustancias sumamente variados. Sin embargo, en último análisis, todos los mecanismos de ataque pueden incluirse básicamente en dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química. El término desintegración mecánica se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, etc. Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas o, cuando mucho, limos y sólo en casos especiales arcillas (Eulalio Juárez & Rico Rodríguez, 1975).

Por descomposición química se entiende la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es, desde luego, el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación, la hidratación y la carbonatación. Los efectos químicos de la vegetación juegan un papel no despreciable. Estos mecanismos generalmente producen arcilla como último producto de descomposición. Todos los efectos anteriores suelen acentuarse con los cambios de temperatura, por lo cual es frecuente encontrar formaciones arcillosas de importancia en zonas húmedas y cálidas, mientras que son típicas de zonas más frías formaciones arenosas o limosas, más gruesas. En los desiertos cálidos, la falta de agua hace que los fenómenos de descomposición no se desarrollen, por lo cual la arena predomina en esas zonas; allí los efectos de ciclos de tensiones y compresiones sobre las rocas, producidos por elevaciones y descensos periódicos y continuados de temperatura, son los mecanismos de ataque determinantes. No debe creerse, sin embargo, que las reglas anteriores sean inmutables; la naturaleza suele actuar con una complejidad que desafía cualquier regulación. Por ejemplo, en países fríos o secos pueden existir formaciones arcillosas de importancia, cuando el aporte de

corrientes de agua quede en condiciones favorables para constituir un depósito (Rodríguez & del Castillo, 2009).

Los suelos deben, pues, su origen a una tal variedad de causas que excede todo poder de descripción detallada. El resultado de ese concurso de causas, es una inmensa diversidad de tipos de suelo resultantes. También debe notarse que su formación ha ocurrido a través de las Eras Geológicas, tal como sigue ocurriendo hoy (Eulalio Juárez & Rico Rodríguez, 1975).

6.1.2. Composición de las partículas de suelo

La naturaleza y disposición de los átomos en una partícula de suelo, es decir su composición, tiene una considerable influencia sobre la permeabilidad, resistencia y transmisión de esfuerzos en los suelos, especialmente en los de grano fino. Existen ciertos minerales que pueden conferir propiedades no usuales al suelo que los contiene. Ejemplos de ellos son la montmorillonita y la haloisita. La montmorillonita puede hacer que un suelo sea muy expansivo, mientras que la haloisita puede dar lugar a que un suelo tenga peso específico muy bajo (Lambe & Whitman, 2008).

Una partícula de un suelo puede ser orgánica o inorgánica: Se conoce muy poco sobre la composición de los suelos orgánicos. Existen suelos formados totalmente por partículas orgánicas, como la turba o el musked, mientras que hay suelos que contienen algunas partículas orgánicas y algunas inorgánicas, como el "limo orgánico". Una partícula de suelo inorgánico puede ser un mineral o una roca. Un mineral es un elemento o compuesto químico presente en la naturaleza y formado por un proceso geológico, es decir, tiene una composición química expresable mediante una fórmula. Una roca es un material sólido que constituye la corteza exterior de la tierra y está formada por uno o más minerales o cristales (Lambe & Whitman, 2008).

Los minerales han sido clasificados según la naturaleza de los átomos y su disposición. La primera clasificación comprende grupos como carbonatos, fosfatos, óxidos y silicatos. Esta clasificación tiene un valor limitado en la ingeniería civil ya que los minerales más abundantes e importantes son los silicatos. De hecho, si se tuviera la masa total de todos los suelos existentes aproximadamente el 90% del peso corresponde a los silicatos (Lambe & Whitman, 2008).

Los suelos proceden generalmente de la descomposición de las rocas, por lo cual los minerales más abundantes en los suelos son los propios de las rocas y aquellos más resistentes a

la meteorización física y química. Los minerales de estructura en capa o retículo son por lo tanto los constituyentes más abundantes y comunes de los suelos (Lambe & Whitman, 2008).

6.1.3. Minerales constitutivos de las arcillas

La investigación de las propiedades mineralógicas de las arcillas presenta gran importancia en cuestiones de ingeniería, ya que su comportamiento mecánico se ve decisivamente influido por su estructura en general y constitución mineralógica en particular. Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratado, presentando, además, en algunas ocasiones silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la sílice y la alúmina (Eulalio Juárez & Rico Rodríguez, 1975).

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en tres grandes grupos: caolinitas, montmorillonita e illitas. Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caolinitas serán relativamente estables en presencia del agua. Las montmorillonitas están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente, en una expansión. Las arcillas montmorillonitas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Por otro lado, las illitas están estructuradas análogamente que las montmorillonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su expansividad es menor que la de las montmorillonitas y, en general las arcillas illíticas, se comportan mecánicamente en forma más favorable para la ingeniería (Eulalio Juárez & Rico Rodríguez, 1975).

6.1.4. Capilaridad en suelos

Existe una gran evidencia de que una superficie líquida resiste tensiones debido a la atracción superficial entre moléculas adyacentes. Esta atracción viene medida por la tensión

superficial, una propiedad constante de cualquier líquido puro en contacto con otro líquido o con un gas a cierta temperatura. Un ejemplo de esta evidencia es el hecho de que el agua puede ascender y mantenerse por encima del nivel de presión atmosférica en un tubo muy fino o tubo capilar. Este fenómeno se denomina comúnmente *capilaridad* (Lambe & Whitman, 2008).

La capilaridad permite que un suelo seco succione agua a niveles por encima del freático; también da lugar a que un suelo drenante retenga agua por encima del nivel freático. La altura de la columna de agua que un suelo puede mantener de esta forma se denomina altura o carga capilar y es inversamente proporcional al tamaño de los poros del suelo en el contacto aire-agua. Como cualquier suelo tiene un número casi infinito de poros, puede existir un número casi infinito de alturas capilares. En otras palabras, la altura de la columna de agua que puede mantenerse depende del tamaño eficaz de los poros. No existe por tanto una altura capilar única para un suelo (Lambe & Whitman, 2008).

6.1.5. Estabilización de suelos

Se refiere a la mezcla de dos o más suelos diferentes o a la mezcla de un suelo con otro geomaterial o con productos químicos que pueden modificar sus propiedades ingenieriles y geotécnicas según los requisitos del proyecto. Las principales razones para realizar la estabilización del suelo son las siguientes:

- Mejorar de la resistencia y de la capacidad de carga.
- Disminuir la permeabilidad del suelo.
- Controlar las emisiones de polvo

La estabilización del suelo es un proceso muy común para casi todos los proyectos viales. En términos generales, todos los tipos de estabilización del suelo se pueden clasificar en estabilización mecánica y estabilización química. En la estabilización mecánica, la clasificación de un suelo se cambia mezclándolo con otros tipos de suelos de diferentes calidades. Al hacerlo, se puede lograr una masa de suelo compactada. Por otro lado, la estabilización química está asociada con la modificación de las propiedades del suelo mediante la adición de productos químicos. En la estabilización del suelo, es muy importante comprender las propiedades de los materiales involucrados en la mezcla y el desempeño del sistema luego del proceso de estabilización. De igual forma, es necesario evaluar los efectos del proceso en el medio ambiente. En consecuencia, se pueden tomar decisiones sobre la selección de materiales y las dosificaciones

adecuadas para un adecuado desempeño del suelo modificado y un mínimo de impacto ambiental. Otros aspectos no menos importantes que deben tenerse en cuenta, están asociados al proceso constructivo para la aplicación de estas tecnologías que involucran el uso de estabilizantes químicos tales como: mezcla y homogeneización, selección de la maquinaria adecuada, espesor de la estabilización, mecanismo de compactación y curado, condiciones ambientales y climáticas (Patel, 2019).

Desde un principio se tiene que reconocer que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no siempre es ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, siempre se deben tener en cuenta el conjunto de propiedades que se desee mejorar, la relación entre lo que se logrará al mejorarlas, el esfuerzo y los costos de inversión. Solo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de estabilización de suelos (Rodríguez & del Castillo, 2009).

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte sólo aplicable a un número limitado de tipos de ellos; en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, mientras que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económicamente se deban involucrar varios tipos de suelos, a veces con variaciones de alguna significación, donde se renunciaría correspondiente al empleo del procedimiento "óptimo" en cada clase (Rodríguez & del Castillo, 2009). Sin embargo, de un modo generalizado y con base en estudios realizados de estabilización de suelos viales, se han podido establecer métodos de estabilización de acuerdo al tipo de suelo, así como se muestra en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. Método recomendado de estabilización según tipo de suelo.

Tipos de suelo	Métodos de estabilización más efectivos
Suelos granulares gruesos	Mezcla mecánica, asfaltos, cemento, cenizas volantes
Suelos de grano finos	Mezcla mecánica, estabilización con cemento Portland, cenizas volantes, asfaltos, cloruros
Arcillas de baja plasticidad	Compactación, estabilización con cemento Portland, impermeabilizantes químicos, estabilización con cal
Arcillas de alta plasticidad	Estabilización con cal

Fuente: Adaptado de (Solminihac et al., 1989).

Tabla 2. Método recomendado de estabilización de acuerdo al propósito deseado y tipo de suelo.

	Propósito	Tipo de suelo con los métodos de estabilización recomendados
1. Estabilización de subrasante	A. Características mejoradas de transporte de carga y distribución de tensión	<i>Granular grueso:</i> AS, Ce, MM, Co <i>De grano fino:</i> AS, SQ, MM, Co <i>Arcillas de bajo P1:</i> Co, Ce, SMCe, SCMa, Ca <i>Arcillas de alto P1:</i> Ca, SMCa
	B. Reduce la susceptibilidad a las heladas	<i>De grano finos:</i> SMCe, AS, Ce, CV <i>Arcillas de bajo P1:</i> SMCe, Ce, Ca, IQ, SMCa
	C. Impermeabilización y escorrentía mejorada	<i>Arcillas de bajo P1:</i> SMCe, AS, IQ, SMCa, Ca
	D. Control de contracción y oleaje	<i>Arcillas de bajo P1:</i> SMCe, Ce, IQ, Co, SMCa, Ca <i>Arcillas de alto P1:</i> Ca
	E. Reduce la resiliencia	<i>Limos:</i> Ca, SMCa <i>Arcillas elásticas:</i> Ce, SMCe
2. Estabilización de base	A. Mejora de materiales de calidad inferior	<i>De grano fino:</i> Ce, AS, CV, MM <i>Arcillas de bajo P1:</i> Ce, Ca
	B. Características mejoradas de transporte de carga y distribución de tensiones	<i>Granular grueso:</i> AS, Ce, MM, CV <i>De grano fino:</i> Ce, AS, CV, MM
	C. Reducción de bombeo	<i>De grano fino:</i> Ce, AS, CV, MM, membranas
3. Cunetas (sin)	A. Capacidad mejorada de carga	<i>Todo tipo de suelos:</i> ver sección 1.A., también MM (<i>Nota: ver en referencia</i>)
	B. Durabilidad mejorada	<i>Todo tipo de suelos:</i> ver sección 1.A.

C. Impermeabilización y escorrentía mejorada	<i>Suelos plásticos: SMCe, Ca, IQ, SMCa</i>
D. Control de contracción y oleaje.	<i>Suelos plásticos: ver sección 1.3.</i>
4. Polvo paliativo	<i>De grano finos, suelos plásticos: SMCe, CL, AS, oleo o spray de superficie bituminosa, SMCe, Ca, SMCa</i>
5. Revestimiento de zanjas	<i>De grano finos: CSP, Ce, AS</i> <i>Suelos plásticos: CSP, SQ</i>
6. Parches y reconstrucción	<i>Suelos granulares: Ce, AS, CV, MM</i>

Leyenda: AS = asfalto; Ca = cal; Ce = cemento; Co = compactación; CL = cloruros; CSP = cemento de suelo de plástico; CV = cenizas volantes; IQ = impermeabilizantes químicos; MM = mezcla mecánica; SQ = solidificadores químicos; SMCa = suelo modificado con cal; SMCe = suelo modificado con cemento.

Fuente: Adaptado de (de Solminihac et al., 1989).

6.1.6. Estabilización mecánica

La estabilización mecánica es la combinación o mezcla de suelos con dos o más graduaciones, para obtener un “nuevo” material, ya sea para material de base, subbase o cualquier otro material deseado. Lo que se busca entonces es complementar las características en cuanto a graduación de los suelos existentes en el lugar del proyecto con materiales que le provean mejores características granulométricas principalmente. Otro de los objetivos de este tipo de estabilización es mejorar la plasticidad de los materiales, es decir, disminuir la susceptibilidad del material a la humedad y mejorar su capacidad drenante. Esto último está íntimamente relacionado con la resistencia, la trabajabilidad y la compacidad (compactación) final. Cuando se emplea este tipo de estabilización, lo importante es utilizar las proporciones adecuadas de cada material, esto se puede lograr mediante prueba y error y/o empleando diagramas triangulares, cuando se trate de tres materiales diferentes (Arriata & Obando, 2008).

6.1.7. Estabilización química

La estabilización química se refiere al cambio de las propiedades de suelos logrado mediante la adición de cementantes orgánicos, inorgánicos o sustancias químicas especiales. Es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado

estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio (Gutiérrez Montes, 2010).

6.1.7.1. Métodos tradicionales de estabilización química

6.1.7.1.1. Aplicación de cemento en la estabilización de suelos

El cemento, mezclado íntimamente con el suelo desarrolla una red de enlaces durante las reacciones de hidratación que proporciona a la mezcla, una buena capacidad de soporte e incluso, con la dotación adecuada, una cierta resistencia mecánica a corto plazo, y mejora tanto su durabilidad, entendiendo por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como su estabilidad dimensional. La gama de suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplia. Aunque son los suelos granulares los que presentan una mejor y más rápida mejora de resultados ante una reducida aportación de cemento, no se debe a priori eliminar otros tipos, pues se dan casos de suelos de elevada plasticidad cuyo comportamiento es mejor al ser mezclados con cemento que con cal (Cedeño Plaza, 2013).

Con suelos muy finos y arcillosos suele resultar más adecuado realizar un tratamiento mixto cal-cemento: la aplicación de la cal logra reducir la plasticidad y consigue agrupar los finos en granos de mayor diámetro sobre los que sí puede actuar el cemento, lográndose obtener una resistencia apreciable. Análogamente se puede emplear este doble tratamiento en suelos muy húmedos, donde la cal actúa secando. En la estabilización mixta, antes de la aplicación del cemento, conviene dejar un período de actuación de la cal de al menos 5 o 6 horas (plazo que se debe definir en los ensayos previos (Cedeño Plaza, 2013).

6.1.7.1.2. Aplicación de cal en la estabilización de suelos

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas a temperaturas entre 880 y 9000C, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. La adición de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-base y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor y menor grado, produce aumento en su límite líquido y mayor incremento en su límite plástico para generar así una disminución en su índice plástico; aumentando la

estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos y la resistencia a la compresión simple y el CBR (Ulloa López, 2015).

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo. Una mínima cantidad de cal para tratamiento se utiliza para secar y modificar temporalmente los suelos. Tal tratamiento produce una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales. Un mayor grado de tratamiento, respaldado por las pruebas, diseño y las técnicas apropiadas de construcción, producen la estabilización estructural permanente del suelo. La mayor parte de cal para el tratamiento de suelo, se usa en la construcción de carreteras. Sin embargo, el empleo de cal para el secado de suelos, la modificación temporal y la estabilización permanente no se limita a la construcción de carreteras, ahora mismo es un método práctico y económico para comunidades rurales que no cuentan con suficiente presupuesto para un proyecto de pavimentación (Ulloa López, 2015).

La estabilización con cal produce en el suelo un aumento de la resistencia al esfuerzo cortante, que aumenta con la proporción de cal utilizada, el tiempo transcurrido, la temperatura de curado y la disgregación que se haya conseguido del suelo. Por otro lado, también aumenta la humedad óptima de compactación, que permite que suelos de elevada humedad natural puedan conseguir una densificación adecuada (Ulloa López, 2015).

6.1.7.1.3. Aplicación de cenizas volantes en la estabilización de suelos

Las cenizas volantes son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases que no son captadas por medio de filtros electrostáticos. En el ámbito internacional las cenizas volantes son utilizadas en grandes cantidades, especialmente en la producción de cementos y concretos, rellenos estructurales y no estructurales, muros de contención, estabilización de desechos, bases y sub-bases para pavimentos, como acondicionador de suelos y, en algunos casos, en los pavimentos rígidos (Ortiz et al., 2006).

Las cenizas volantes tradicionales se caracterizan por su bajo contenido de cal y alto contenido de sílice, por lo que su utilización como estabilizador de suelos requiere la adición de un agente activador rico en cal. El agente activador provee la cal necesaria para que se produzca la reacción puzolánica, mientras que la ceniza provee los compuestos puzolánicos, sílice y alúmina. Es así como las mezclas cal - ceniza volante pueden ser usadas para estabilizar suelos

gruesos o suelos finos no arcillosos. Normalmente se utiliza cal o cemento como agente activador (Thenoux & Carrillo, 2002).

6.1.7.2. Métodos no tradicionales de estabilización química

6.1.7.2.1. Estabilización con aceites sulfonados

El aceite sulfonado es un agente catalizador que produce intercambio de iones; químicamente es un compuesto orgánico derivado de sulfuros y ácidos combinados. Ioniza el agua aumentando su conductividad y facilitando el intercambio catiónico, ya que la obliga a desprenderse de las partículas de arcilla y la convierte en agua libre, capaz de intercambiar sus cargas eléctricas con los cationes de la arcilla, a los que finalmente neutraliza y obliga en forma permanente a perder su avidez de agua.

En suelos de matriz arcillosa se caracteriza por reducir espacios intersticiales, reducir la permeabilidad, incrementar la sedimentación, mejorar la respuesta a la compactación y aumentar la densidad del suelo. Los estudios realizados con aceites sulfonados y la evidencia obtenida mediante ensayos realizados en campo, muestran que el sistema de estabilización electroquímica es una alternativa competitiva para disminuir el potencial expansivo de los suelos arcillosos. No se han reportado efectos contaminantes por el uso de aceite sulfonado en las concentraciones utilizadas para esta aplicación (Camacho-Tauta et al., 2010).

6.1.7.2.2. Aplicación de enzimas orgánicas en la estabilización de suelos

El aditivo estabilizador enzimático se presenta en forma líquida o en polvo, de carácter no contaminante, ni perjudicial al ser humano, altamente concentrado y de fácil manejo. La enzima no presenta toxicidad al suelo, debido a que resulta de componentes orgánicos como la caña de azúcar (melaza) y otros. Aplicado en suelos arcillosos disminuye los costos de reparación y mantenimiento. La implementación de un estabilizador a base de enzimas orgánicas aplicada a un suelo, tendrá como resultado el incremento de los valores de CBR, disminución de la absorción de agua, incremento en la densidad del suelo, baja permeabilidad. El uso de enzimas como medio estabilizante de suelo reducirá los costos de transporte vinculados al cambio de suelo, es decir al material de desalojo y a la colocación de agregado grueso (Benavides, 2016).

El uso de enzimas como estabilizadores no ha sido sujeto a ningún desarrollo o especificación técnica y su uso se lleva a cabo bajo datos empíricos basados en experiencias

previas. No está claro exactamente bajo qué condiciones trabajan estos productos y debido a ello es muy importante estudiar y determinar los efectos de las enzimas sobre la estructura de los diferentes tipos de suelos (Cedeño Plaza, 2013).

6.1.7.2.3. Aplicación de polímeros en la estabilización de suelos

Los polímeros se distinguen de los materiales con moléculas tamaño normal, por sus propiedades mecánicas, ya que los polímeros se caracterizan por tener buena resistencia mecánica; esto se debe a las fuerzas de atracción de sus cadenas poliméricas y su atracción depende de la composición química del polímero; la más común es las fuerzas de Van der Waals, la cual son de alta resistencia a la tensión, al impacto y a la fatiga (Chávez & Karen, 2018).

La molécula de un polímero final puede constituirse de miles de unidades que se repiten y cada una se denomina "mero o unidad manométrica". El número de unidades manométricas contenidas en el polímero recibe el nombre de grado de polimerización. Los altos polímeros artificiales son los obtenidos por transformación química de los altos polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular. Los altos polímeros sintéticos son los que se obtienen por vía puramente sintética a partir de sustancias de bajo peso molecular; por ejemplo, el nylon, polietileno, estireno, etc. (Ayala Avellán, 2017).

Los geoproductos se aplican a una amplia variedad de obras, como taludes y muros de tierra, terraplenes en suelos blandos, control de erosión, almacenamientos, cortinas de presas, canales, vías de comunicación, sistemas de filtración y drenaje, disposición de residuos, entre otros. En la pavimentación los polímeros son adicionados a los asfaltos, generando efectos como el cambio en la relación viscosidad-temperatura, sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas, mejorando el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas. Incorporar polímeros con asfaltos hace que aumente la cohesión interna, disminuya la susceptibilidad térmica, mejora la flexibilidad, elasticidad y el comportamiento de fatiga a bajas temperaturas, también ayuda al aumento de la resistencia por envejecimiento. Los polímeros disminuyen de la susceptibilidad térmica al pavimento, se obtienen mezclas rígidas con altas temperaturas de servicio; y se llega a obtener mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el nivel de fisuramiento. Se limita la exudación del asfalto: a mayor viscosidad de la mezcla, tiene menor tendencia a fluir y mayor elasticidad (Ayala Avellán, 2017).

La estabilización de suelos con polímeros mejora la adherencia y la cohesión, debido a que tienen en su composición cadenas cortas. Los polímeros aumentan la trabajabilidad, la compactación y hacen que el módulo de mezcla se amplíe permitiendo la reducción de hasta el 20% de los espesores por este módulo. Los polímeros son resistentes al agua, reducen los costos de mantenimiento de la vía tratada y tienen resistencia al derrame de combustibles y al envejecimiento (Ayala Avellán, 2017).

Los polímeros operan como un agente catalítico de intercambio iónico sobre la fracción activa de las partículas de arcillas reduciendo el potencial electrostático de las partículas, quitándoles la capacidad para absorber agua. Esta reacción logra que el suelo tenga mayor capacidad de resistencia ante las cargas expuestas de los vehículos y tenga una estabilidad permanente (Chávez & Karen, 2018).

6.1.7.2.4. *Aplicación de organosilanos en la estabilización de suelos*

La sinergia entre la química orgánica y las siliconas ha sido investigada por más de 50 años, en los que se han desarrollado órgano-funcionales silanos, que se han hecho esenciales en muchas aplicaciones. Los químicos monoméricos de silicona son conocidos como silanos. Un organosilano es la unión de un silano que contiene al menos un enlace de silicona-carbono (ej. Si-CH₃). El enlace de carbono-silicona es muy estable, y en presencia de un grupo alquilo genera una superficie que tiene propiedades hidrofóbicas. Los órgano-funcionales silanos son moléculas que contienen dos grupos reactivos distintos en su átomo de silicona, que pueden reaccionar con distintos materiales. Dicha particularidad fue descubierta en 1940, durante el desarrollo de fibras de vidrio reforzadas, en donde encontraron que los órgano-funcionales silanos no solo previnieron el ingreso de agua y el desplazamiento de enlaces en la interface de fibra/resina, si no que incrementaron significativamente la fuerza de contacto entre enlaces. Por medio de un proceso de hidrolisis, se forman los enlaces silanol (Si-OH), que son reactivos entre si y pueden formar a su vez enlaces siloxanos (=Si-O-Si=) que van unidos con la superficie que se crea de silanol. El grupo orgánico contiene una larga cadena de alquilo, que es responsable de generar propiedades hidrofóbicas a la superficie tratada (Rodríguez & del Castillo, 2009).

El organosilano tiene la capacidad de formar capas individuales ensambladas, las cuales permiten que se formen grupos de silanol intermedios, lo que genera una superposición de capas. Estos grupos a su vez reaccionan con grupos hidroxilo libres de la superficie, inmovilizando

covalentemente el organosilano. La selección del organosilano depende del uso que se vaya a dar al producto final, así como la forma de aplicación del producto, ya que no todos los silanos tienen las mismas propiedades, ni reaccionan de la misma forma en presencia de agua. Existen distintos tipos de organosilanos que se clasifican según su uso (Rodríguez Pardo, 2017).

6.2. Intemperismo natural e intemperismo acelerado

El intemperismo natural es el proceso de transformación química que sufren los materiales expuestos al exterior a través del tiempo por efecto natural del medio ambiente (sol, lluvia, viento, etc.), es decir, sufren degradación en sus capas superficiales. Los rayos solares (formados por ultravioleta, infrarrojos, gama etc.) afectan la estructura de los materiales que se exponen, junto con la humedad y la temperatura, ayudando a incrementar dicha degradación.

El intemperismo acelerado es el proceso de transformación química acelerada de los materiales cuando se someten a fenómenos naturales simulados en cámaras de prueba llamadas “Cámaras de envejecimiento acelerado”. Estos equipos permiten lograr en menor tiempo los cambios que se presentan en dicho material por una exposición natural prolongada, al simular condiciones de radiación UV, temperatura y humedad relativa, de esta forma se obtiene información de la evolución de los materiales en el tiempo en un corto plazo posibilitando el cálculo del tiempo que resiste un material expuesto a estas condiciones contra el tiempo real al que se enfrenta en condiciones de uso diario (Espinosa, 2007; Patel, 2019).

6.2.1. Cámara de Envejecimiento Acelerado QUV

La cámara QUV es un equipo de laboratorio que expone los materiales a ciclos alternados de radiación ultravioleta y humedad a temperaturas elevadas y reguladas. Utiliza lámparas fluorescentes ultravioleta (UV) para simular los efectos de la luz solar. La radiación ultravioleta es responsable de casi toda la foto-degradación en los materiales durables expuestos a la intemperie. Las lámparas fluorescentes simulan la luz ultravioleta de onda corta crítica y reproducen el daño a las propiedades físicas causadas por la luz solar. Alternadamente utiliza humedad de condensación y/o rociado con agua para simular los efectos de la lluvia y el rocío. Los tipos de daños incluyen cambio de color, pérdida de brillo, desintegración en polvo, resquebrajamiento, cuarteado, fisuras, fragilización, pérdida de consistencia y oxidación (Q-LAB, 2020).

La cámara acepta dos métodos de simulación de la humedad. Para gran parte de las aplicaciones, la humedad de condensación es la mejor manera de simular el ataque de humedad a la intemperie. Todos los modelos QUV aceptan un ciclo de condensación programado. Debido a que ciertas aplicaciones también requieren rociado con agua para obtener resultados realistas, algunos modelos QUV pueden producir tanto condensación como rociado con agua (Q-LAB, 2020). En la Imagen 1 se muestra una fotografía de la cámara QUV utilizada.



Imagen 1. Cámara QUV de envejecimiento acelerado.

6.3. Proctor estándar

El ensayo de proctor es el proceso que implica reducir los vacíos presentes en un suelo, conduciendo a una variación de volumen para un porcentaje de humedad; la compactación no reduce en su totalidad los espacios vacíos y no se expulsa toda la humedad por esta razón la condición de un suelo compactado en carretera es un suelo que se encuentra parcialmente saturado. La compactación es un proceso manual o mecánico, del cual se espera conseguir mejores rasgos en los suelos que forman la sección estructural de un pavimento o carretera, con la finalidad de que la obra resulte duradera y cumpla con el objetivo por el cual fue proyectada (Rodríguez & del Castillo, 2009).

6.4. Lixiviación

La extracción de un constituyente soluble de un sólido por medio de un disolvente se denomina lixiviación o extracción sólido líquido. Este proceso puede utilizarse para la producción concentrada de material sólido valioso, o para eliminar de un sólido insoluble, como por ejemplo un pigmento, un material soluble que lo está contaminando. El método utilizado para la extracción

estará determinado por la proporción de componente soluble presente, su distribución en el sólido, la naturaleza de dicho sólido y el tamaño de partícula (Coulson & Richardson, 1984).

6.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO

Es la cantidad de oxígeno que utilizan los organismos para consumir materia orgánica oxidable en un tiempo determinado. La DBO es un indicador de contaminación orgánica en cuerpos de agua dulce, correlacionada con la contaminación microbiológica. Las altas concentraciones de DBO reducen la disponibilidad de oxígeno, degradan los hábitats acuáticos y la biodiversidad y dañan el uso del agua. Las altas cargas de DBO en los sistemas de agua dulce provienen principalmente de fuentes antropogénicas, que comprenden desechos domésticos y de ganado, emisiones industriales y desbordamientos combinados de alcantarillado. Mientras se transporta a través de la red de arroyos, las concentraciones de DBO se reducen por la degradación microbiana (auto-purificación del río) y la dilución antes de llegar a los mares (Vigiak et al., 2019).

La DBO da una idea de la concentración de materia orgánica biodegradable, y se calcula a partir de la medida de la disminución de la concentración de oxígeno disuelto, después de incubar una muestra durante un determinado periodo de tiempo. La medida debe hacerse en la oscuridad, para evitar la producción fotosintética de oxígeno, y manteniendo un pH de 7-7,5. Un agua residual urbana tiene, en general, valores de DBO5 entre 100 y 400 mg de O₂/ L (Peral & Doménech, 2006).

6.6. Demanda Química de Oxígeno DQO

Es un parámetro analítico de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de la DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte. Específicamente, representa el contenido orgánico total de la muestra, oxidable por dicromato en solución ácida. El ensayo tiene la ventaja de ser más rápido que la DBO y no está sujeto a tantas variables como las que pueden presentarse en el ensayo biológico. Todos los compuestos orgánicos, con unas pocas excepciones, pueden ser oxidados a CO₂ y agua mediante la acción de agentes oxidantes fuertes, en condiciones ácidas (Vigiak et al., 2019).

El valor de la DQO es mayor que el correspondiente a la DBO, puesto que el oxidante utilizado en la determinación es más fuerte que el oxígeno y por tanto oxida un mayor número de substancias. Un agua residual urbana presenta valores de DQO entre 250 y 1000 mg O₂/L (Peral & Doménech, 2006).

6.7. Carbono Orgánico Total COT

Se refiere a la cantidad de carbono que se encuentra en cualquier compuesto orgánico y se puede aplicar a una amplia gama de aplicaciones, como verificar la calidad del agua, analizar la limpieza de un equipo farmacéutico o identificar el carbono en una muestra de suelo. La concentración de COT en el agua es una indicación básica de la escala de contaminación orgánica y la pureza del agua. Como sustancia, el agua puede contener materia orgánica natural y sintética, que se mide utilizando la prueba COT. Algunos ejemplos de materia orgánica natural son las aminas, urea e incluso materia fecal. Los contaminantes sintéticos incluyen, entre otros, pesticidas, detergentes y fertilizantes sintéticos. Con materia natural y sintética, COT les da a los científicos una buena idea de la composición del agua que se está consumiendo (Morgan, 2018).

Algunos de estos compuestos de carbono pueden oxidarse mediante procesos biológicos o químicos como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), carbono orgánico asimilable (COA) y demanda química de oxígeno (DQO). El carbono orgánico total (COT) es una expresión más conveniente y directa del contenido orgánico total que la DBO, COA y la DQO, pero no proporciona el mismo tipo de información. Si se establece una relación empírica repetible entre COT y DBO, COA o DQO para una fuente de agua específica, se puede usar el COT para estimar la DBO, COA o DQO que lo acompañan. Esta relación debe establecerse de forma independiente para cada conjunto de condiciones de la matriz, como varios puntos en un proceso de tratamiento. A diferencia de la DBO o la DQO, el COT es independiente del estado de oxidación de la materia orgánica y no mide otros elementos unidos orgánicamente, como nitrógeno e hidrógeno, e inorgánicos que pueden contribuir a la demanda de oxígeno medida por la DBO y la DQO. La medición del COT no reemplaza las pruebas de DBO, AOC y DQO (American Public Health Association et al., 2017). La medición de COT es de vital importancia para la operación de plantas de tratamiento de aguas y tratamiento de residuos. Los COTs de agua potable van desde menos de 100 µg / L hasta más de 25,000 µg / L. Las aguas residuales pueden contener niveles muy altos de compuestos orgánicos (COT > 100 mg / L). Algunas de estas aplicaciones pueden incluir aguas con

impurezas iónicas sustanciales, así como materia orgánica. En muchas aplicaciones, la presencia de contaminantes orgánicos puede degradar la capacidad de intercambio iónico, servir como fuente de nutrientes para el crecimiento biológico no deseado, o ser perjudicial para el proceso para el cual se utilizará el agua. En particular, para aguas de beber, los compuestos orgánicos pueden reaccionar con desinfectantes para producir compuestos potencialmente tóxicos y cancerígenos. Para determinar la cantidad de carbono unido orgánicamente, las moléculas orgánicas deben descomponerse y convertirse en una única forma molecular que se pueda medir cuantitativamente. Los métodos para determinar COT utilizan alta temperatura, catalizadores y oxígeno, o temperaturas más bajas ($<100^{\circ}\text{C}$) con irradiación ultravioleta, oxidantes químicos o combinaciones de estos oxidantes para convertir el carbono orgánico en dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 puede purgarse de la muestra, secarse y transferirse con un gas portador a un analizador de infrarrojos no dispersivo. Alternativamente, se puede separar de la fase líquida de la muestra mediante una membrana selectiva al CO_2 en un agua de alta pureza en la que el correspondiente aumento de la conductividad se relaciona con el CO_2 que pasa a través de la membrana (American Public Health Association et al., 2017).

6.8. Biodegradabilidad

Es la capacidad de un material de ser biodegradado, es un proceso natural en el que un material por acción biológica, cambia y en general pierde sus propiedades originales y a nivel químico las moléculas que lo conforma se convierten en formas más simples y estables, pudiendo ser la forma más oxidada de la molécula original. Para materiales de carbón la forma más oxidada es el dióxido de carbono CO_2 y la forma más reducida es el metano (CH_4), el agua (H_2O), minerales y biomasa. La determinación de la biodegradabilidad tiene en cuenta factores ambientales que favorecen la descomposición biológica en medios aerobios y anaerobios (Rineanu, 2016).

Habitualmente se utiliza la relación DBO/DQO para estimar la biodegradabilidad de un agua residual; así, para relaciones DBO/DQO superiores a 0,4 el agua puede considerarse biodegradable (material orgánico), mientras que las aguas con relaciones DBO/DQO inferiores a 0,2 (material inorgánico), son básicamente no biodegradables (Peral & Doménech, 2006).

Existen diferentes procesos para el tratamiento de aguas y estos se implementan de acuerdo a los contaminantes presentes en el cuerpo de agua y al presupuesto que se tenga. Existen básicamente dos tipos de tratamiento de aguas residuales; los procesos biológicos y los procesos

fisicoquímicos. El tratamiento biológico se basa en la capacidad que tienen los microorganismos para metabolizar y convertir la materia orgánica, en suspensión y ya disuelta, en tejido celular nuevo y diferentes gases. Teniendo en cuenta que el tejido celular es más denso que el agua, este se puede eliminar fácilmente con procesos de decantación; por tal razón, sólo hasta cuando los microorganismos involucrados en el proceso de transformación y eliminación de la materia orgánica son separados de la solución, se puede decir que el proceso de tratamiento está completo (Quiroga & López, 2008). Por otro lado, los procesos químicos, que fueron los primeros empleados en el tratamiento de agua, junto a varios procesos físicos, completan el tratamiento secundario y terciario de aguas usadas, incluyendo también aquí la separación de nitrógeno y fósforo. Los procesos químicos de depuración de aguas aplicados actualmente son la coagulación química, la precipitación química, la oxidación-desinfección, los procesos de oxidación avanzada, el intercambio iónico y la neutralización (control de pH), control de incrustaciones y estabilización de efluentes (Galvín, 2012). Por los costos relativamente más bajos, muchas industrias, aún optan por el tratamiento de los efluentes basado en procesos biológicos que permiten obtener eficiencias razonables. Sin embargo, no siempre son significativamente efectivos los procesos biológicos, por lo que surge la necesidad de combinar procesos químicos y biológicos para un adecuado tratamiento de los efluentes. La integración entre tratamiento biológico y químico se presenta con especial importancia en la práctica de la ingeniería química-sanitaria, principalmente desde el punto de vista económico para incrementar la tratabilidad de los efluentes biorefractarios (Rodríguez et al., 2008).

6.9. Material Particulado

Las "partículas" se definen como cualquier material que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas. Se emplea el término de material particulado (MP) para describir un tipo de contaminante del aire que constituye una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas, ya sean sólidas o líquidas, que presentan una composición física y química variable. Las características físicas de las partículas ejercen influencia en su transporte, tiempo de permanencia y la posibilidad de depositación, tanto en el medio ambiente como a través del sistema respiratorio, y su composición química interviene directamente sobre los efectos en la salud humana (Lozada, 2006).

De acuerdo con el diámetro de las partículas y a su importancia en la contaminación del aire, el MP se puede clasificar de la siguiente forma:

6.9.1. Partículas finas

Corresponden al MP con diámetro aerodinámico menor que $2.5\mu\text{m}$ y son denominadas MP2.5 (Lozada, 2006).

6.9.2. Partículas gruesas

Incluye al material particulado con un diámetro aerodinámico entre $2.5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$. El MP con un diámetro aerodinámico inferior a $10\mu\text{m}$ denominado MP10 y también se utiliza como término integrador del total de partículas finas y gruesas (Lozada, 2006).

6.9.3. Partículas Suspendedas Totales

Se utiliza para denominar el total de las partículas que se encuentran en el aire y usualmente representa todas las partículas con diámetros aerodinámico hasta $50\mu\text{m}$. Generalmente las partículas con diámetros superiores a este no permanecen en el aire por largos periodos de tiempo, sino que sedimentan debido a las fuerzas gravitatorias (Lozada, 2006).

6.9.4. Tipología de las fuentes de emisión de partículas

6.9.4.1. Fuentes naturales de MP

Algunas partículas provienen de fuentes naturales tales como el rocío del agua de mar, partículas de polen, polvo, y partículas provenientes de erupciones volcánicas y procesos geotérmicos, así como de materiales arrastrados por los vientos derivados de la erosión del suelo. Generalmente, las partículas provenientes de fuentes naturales tienden a ser gruesas, con cortos periodos de permanencia en el aire y altas velocidades de sedimentación. La concentración de las partículas se expresa usualmente como la masa total de las partículas en un volumen dado de gas. Las unidades más usadas para expresar la concentración de partículas son los microgramos por metro cúbico (Lozada, 2006).

6.9.4.2. Fuentes antrópicas de MP

Las fuentes antrópicas de contaminación atmosférica por partículas son muy variadas: incluyen procesos industriales de extracción y transformación; procesos de generación de calor a nivel industrial y doméstico; quema de combustibles fósiles, quema de residuos a campo abierto;

actividades de transporte, construcción de infraestructuras, almacenamiento y traslado de materiales; y vehículos, entre otras. Muchas de las partículas emitidas por fuentes antropogénicas tienen diámetro menor a 2.5 micrones e incluyen una gran variedad de elementos tóxicos, en comparación con las partículas emitidas por fuentes naturales (Lozada, 2006).

Según las características de las partículas las fuentes de emisión de MP pueden ser clasificadas en fuentes primarias, las cuales emiten material particulado directamente a la atmósfera, y en fuentes secundarias que se caracterizan por emitir sustancias que forman el material particulado a partir de precursores en la fase gaseosa como consecuencia de procesos físicos y químicos a nivel atmosférico (Lozada, 2006). En la Figura 1 se exponen las principales fuentes de material particulado, tanto primarias como secundarias.

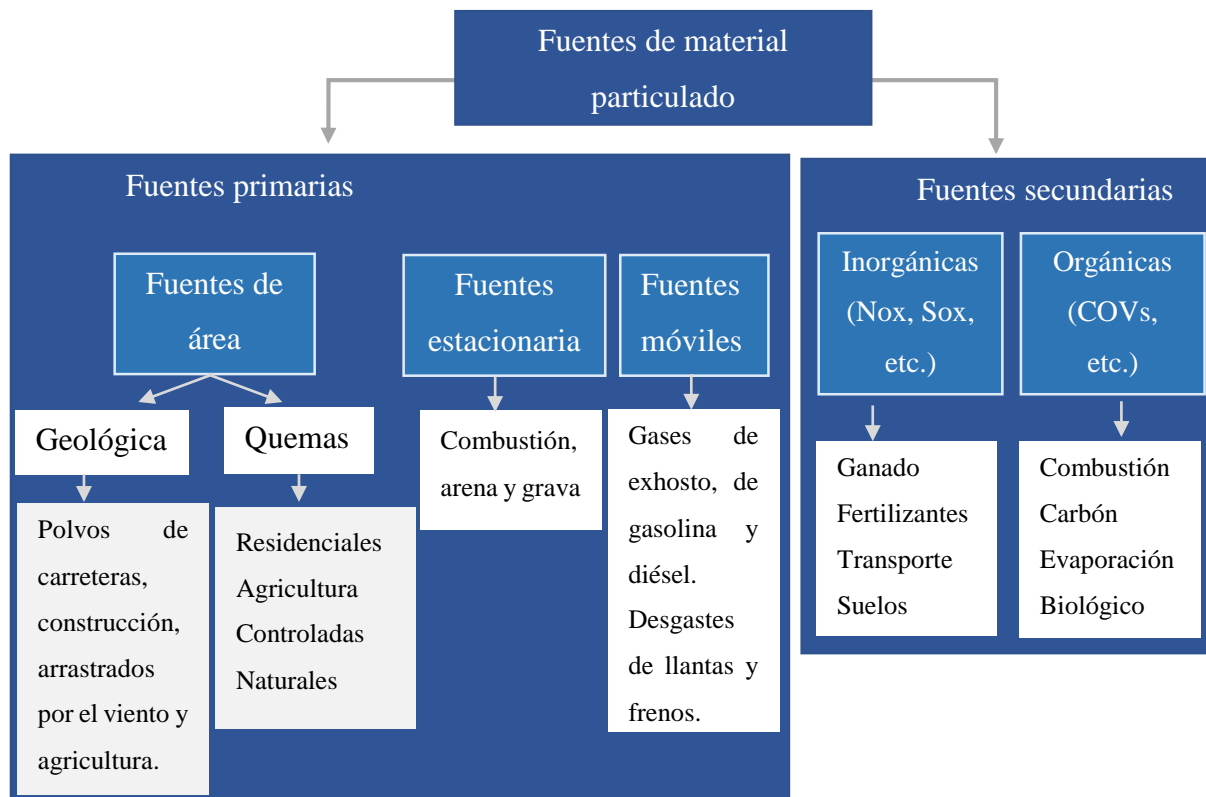


Figura 1. Clasificación de las fuentes de material particulado de origen antrópico.

Fuente: Adaptado de (Lozada, 2006).

6.9.5. Distribución de tamaño de partícula

El material particulado, como se mencionó anteriormente, está compuesto por partículas finas y gruesas, las cuales están contenidas dentro de las partículas suspendidas totales que pueden tener hasta 50µm de diámetro aerodinámico. Las partículas que más afectan la salud son aquellas

que constituyen la fracción respirable, es decir aquellas con diámetro aerodinámico equivalente menor de 10 μm (MP10) y en mayor grado aún las menores de 2.5 μm (MP2.5) (Sbarato et al., 2007).

El tamaño de la partícula determina si esta puede ser inhalada y en cual parte del sistema respiratorio se deposita. Las partículas pueden ser inhaladas cuando son menores a 10 μm . Las partículas de diámetros entre 0.5 y 2.5 μm se depositan en las secciones extratorácicas y en la sección de tráquea-bronquios. Los mecanismos de acción son impactación, asentamiento y sedimentación. Las partículas con diámetro inferior a 1 micrómetro penetran en los alvéolos pulmonares (Lozada, 2006). Además, la presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona impactos a la vegetación, a los materiales y el hombre en otros aspectos, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz (Sbarato et al., 2007). En la Figura 2 se muestra la distribución típica de material particulado en un rango comprendido entre los 0.01 y 100 μm .

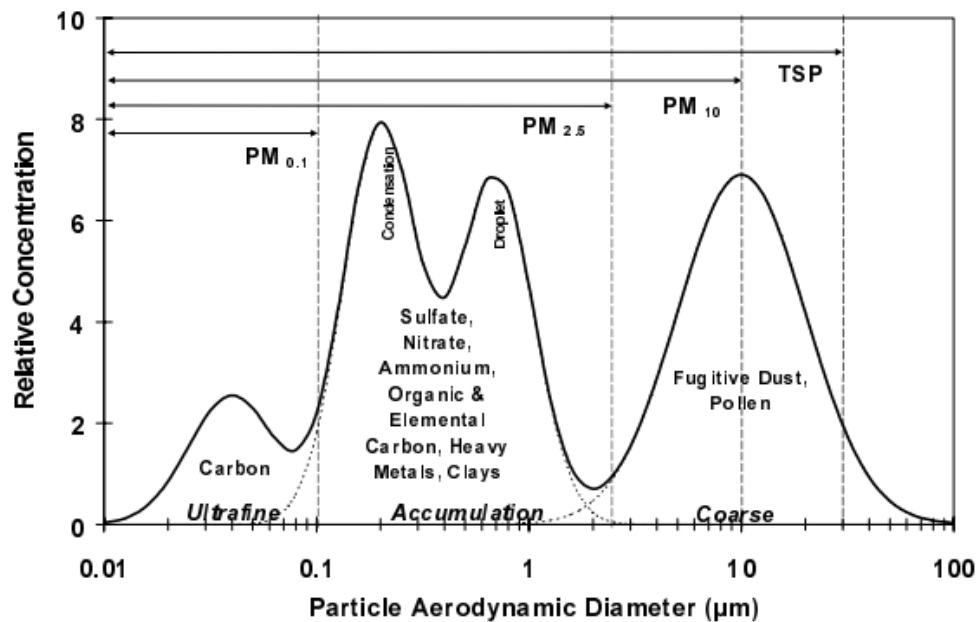


Figura 2. Distribución típica del tamaño de partículas encontradas en la atmosfera. El polvo fugitivo es dominante en esta distribución.

Fuente: Tomado de (Watson & Judith, 2000).

Las “partículas ultrafinas” consisten en aquellas con diámetro menor a 0.08 μm . Son emitidas directamente de fuentes de combustión o de la condensación de gases enfriados poco después de la emisión (Watson & Judith, 2000).

El rango de "acumulación" contiene partículas con diámetro aerodinámico entre 0.08 y 2 μm . Estas partículas resultan de la coagulación de pequeñas partículas emitidas de fuentes de combustión, de la condensación de especies volátiles y de partículas de polvo finamente molidas (Watson & Judith, 2000).

Finalmente, las partículas mayores a 2 o 3 μm se conocen como "partículas gruesas". Estas resultan de actividades de molienda y están dominadas por material de origen geológico. El polvo fugitivo domina este rango de tamaño. El polen y las esporas también habitan en el rango de partículas gruesas, al igual que la basura molida, las hojas y los neumáticos (Watson & Judith, 2000).

6.10. Evaluación de impacto ambiental

El Impacto Ambiental puede ser definido como la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada. Es decir, el impacto ambiental es la modificación del ambiente ocasionado por la acción del hombre o de la naturaleza (Espinosa, 2007).

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es un procedimiento administrativo para el control ambiental de los proyectos que se apoya en la formulación de estudios técnicos o estudios de impacto ambiental y en un proceso de participación pública y de agentes socioeconómicos, y que conduce a un pronunciamiento o decisión de la administración ambiental, es decir la Declaración de Impacto Ambiental sobre el proyecto. La EIA se ha convertido en uno de los principales instrumentos preventivos para la gestión del medio ambiente; para que la sociedad disponga de calidad ambiental (Orea & Villarino, 2013).

El sector de la construcción es considerado mundialmente como una de las principales fuentes de contaminación medioambiental, pues produce enormes efectos negativos en el medio ambiente, ya sea directa o indirectamente. La apertura de carreteras, al igual que todas las obras de infraestructura y actividades humanas, causan efectos negativos sobre el ambiente, cuya identificación y evaluación es importante con el fin de diseñar estrategias que eviten, mitiguen y compensen estos impactos [15]. Entre otros factores que afectan el medio ambiente en el desarrollo de un proyecto para la construcción de infraestructura vial, se encuentran los relacionados con la generación de residuos potencialmente contaminantes (Agudelo et al., 2012; Conesa, 1997).

6.10.1. Evaluación de impacto ambiental en Colombia

La EIA puede considerarse como una herramienta de prevención y control en el contexto del Sistema Nacional Ambiental de Colombia. La aplicación específica de la EIA depende del marco institucional y el contexto socio-político del país o región.

En Colombia la Licencia Ambiental (LA) es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la construcción, operación y desmantelamiento de proyectos, obras y actividades (POA) que pueden generar deterioro al ambiente. Las actividades que requieren LA se encuentran en una lista taxativa en el Decreto 2041 de 2014, excluyendo el procedimiento de “screening” que permite a las autoridades ambientales decidir si un POA requiere LA basados en el análisis de las características del proyecto y de las áreas de influencia directa e indirecta (Calderón et al., 2013). Aunque se han desarrollado diversos métodos para la valoración de Impactos Ambientales, no existe uno universal que pueda aplicarse a todos los tipos de POA en cualquier medio en el que se ubiquen y ninguno que garantice la ausencia de incertidumbres. No obstante, los componentes esenciales del proceso de EIA como el Scoping, Screening y la valoración detallada de los impactos ambientales son universalmente utilizados, pero las técnicas varían ampliamente (Calderón et al., 2013).

La escogencia y aplicación de los métodos y herramientas para la identificación y valoración de impactos ambientales, determinará el grado de significancia de los impactos y el tipo de actividad del plan de manejo ambiental (preventiva, mitigadora, correctiva o compensatoria), de ese modo un método puede favorecer la subjetividad y el sesgo del evaluador y generar calificaciones de impacto por debajo de su valor real, con lo cual la actividad correctora puede no ser efectiva y el impacto producir pérdida de patrimonio ambiental y disminución del bienestar humano (Calderón et al., 2013).

Para el caso de Colombia, no existen métodos oficiales para la evaluación de los impactos ambientales, dejando en el evaluador, o solicitante de la LA, la escogencia del método. En ese sentido es necesario analizar los métodos utilizados para la valoración de los impactos ambientales en el proceso de EIA, con el fin de generar información que permita a las autoridades ambientales y el público en general, tomar decisiones relacionadas con la reglamentación del uso de métodos y a los investigadores la construcción de propuestas más eficientes (Calderón et al., 2013).

7. Metodología

Para el desarrollo de la investigación se hizo permanentemente revisión bibliográfica, basada principalmente en estudios científicos relacionados con la temática de estudio, en normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y en las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM).

Se seleccionó un suelo con propósitos de estabilización, el cual fue aditivado con 7 productos químicos que fueron caracterizados en términos de sus propiedades fisicoquímicas. Se estableció la dosificación para cada aditivo y tanto el suelo como los sistemas aditivados aditivo/suelo se caracterizaron fisicoquímicamente y se evaluaron mecánicamente.

Los sistemas aditivados se expusieron a condiciones de intemperismo acelerado en cámara QUV para su posterior caracterización y evaluación mecánica.

Se realizó la evaluación ambiental mediante ensayos de lixiviación y velocidad de ascenso capilar. Para el lixiviado obtenido, se tomaron mediciones del pH, de demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), además del análisis de biodegradabilidad y material particulado.

Para el suelo y para cada tipo de sistema aditivado químico/suelo se elaboraron 5 probetas; la primera y la segunda probeta se dejaron 7 días curando dentro de una bolsa plástica a condiciones de laboratorio, la tercera y cuarta probeta fueron sometidas a ciclos alternados de radiación UV y condensación en la cámara de intemperismo acelerado durante 216 y 540 h, respectivamente; la quinta probeta se dejó expuesta en el laboratorio durante 20 días para su curado y secado. A la primera probeta se le realizó un ensayo velocidad de ascenso capilar. A la segunda, tercera y cuarta probeta, después de haber pasado los tiempos mencionados, se sometieron a pruebas de lixiviación y al lixiviado obtenido se le midió pH, conductividad, DBO, DQO, COT y biodegradabilidad. Y para la última probeta se realizó un desgaste superficial mediante un cepillo mecánico, y al material suelto obtenido se le determinó su composición química mediante análisis de Fluorescencia de Rayos X, XRF, y se le hizo un análisis de tamaño de partícula.

Finalmente se realizó el análisis de los resultados obtenidos en función de la generación de contaminantes para establecer el nivel de los impactos ambientales generados.

7.1. Materiales

7.1.1. Suelo de estudio

El suelo seleccionado fue tomado de una vía terciaria y se sometió a diferentes pruebas de caracterización, tales como límites de Atterberg, materia orgánica por ignición, contenido de sulfatos, pH, conductividad, peso unitario seco máximo, densidad máxima seca, humedad óptima y porcentaje de expansión. Finalmente, el suelo fue clasificado y caracterizado mediante las metodologías SUCS Y AASHTO.

7.1.2. Aditivos químicos utilizados

Se utilizaron 3 aditivos químicos tradicionales (Cemento, Cal, Zeolita) y 4 no tradicionales (Polímero Enzima, Aceite Sulfonado, Terrasil), los cuales se describen a continuación.

7.1.2.1. *Cemento*

El cemento utilizado se caracteriza por ser un conglomerante hidráulico cuya principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento del suelo estabilizado con cemento ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se hace la mezcla, lo que permite obtener la forma deseada de la probeta, sin embargo, como la dosificación utilizada no es significativamente alta (180 Kg/m^3 de suelo seco), no se tienen problemas de endurecimiento en la mezcla.

El cemento húmedo es alcalino y reacciona con ácidos, sales de amonio, aluminio y otros metales reactivos. En condiciones normales de uso no se esperan productos de descomposición peligrosos para el medio ambiente y ser humano.

El polvo del material seco puede causar irritación y posiblemente quemaduras a los ojos y a las vías respiratorias. No está clasificado como peligroso para el medio ambiente. No obstante, eso no excluye la posibilidad de que vertidos grandes o frecuentes puedan tener efectos nocivos o dañinos para el medio ambiente.

Se caracteriza por su color gris, pH en agua de aproximadamente 12 unidades y una gravedad específica de 3.15.

7.1.2.2. Cal

El producto tiene un porcentaje mínimo de óxido de calcio y magnesio del 90% y un porcentaje máximo de CO₂ del 5%. La cal es desarrollada para el tratamiento de suelos en sitio o en plantas de reciclado, empleada para mejorar las propiedades de ingeniería de los suelos. Se utiliza para el mejoramiento de terraplenes, movimientos de tierra, plataformas temporales o permanentes, bases y sub-bases. También es utilizado sobre obras de infraestructura e ingeniería civil, tales como carreteras, autopistas, vías férreas, aeropuertos, vías terciarias, plataformas industriales, comerciales y residenciales, entre otras.

7.1.2.3. Zeolita

La Zeolita es un aditivo zeolítico en polvo para cemento basado en nanotecnología, formulado a base de zeolitas sintéticas, compuestos inorgánicos de carácter alcalino y activadores químicos de patente, que actúan en el proceso de hidratación del cemento, modificando la dinámica química extendiendo el crecimiento de los cristales cálcicos hexagonales en forma de agujas largas, formando un entramado cristalino que hace posible, para fines de estabilización, el uso de todo tipo de suelos, inclusive arcillas plásticas, incrementando la resistencia a la compresión y a la flexión, el módulo elástico, mejorando la impermeabilidad al agua y su resistencia a los agentes atmosféricos sin presentar agrietamientos ni deformaciones.

El producto cumple con las normas holandesas de productos amigables con el medio ambiente, reduce la emisión de CO₂ en el proceso constructivo, mediante el ahorro de materiales aglutinantes como el cemento, por el uso de menos transporte y por la reducción del espesor de las capas asfálticas. Su color es gris, con pH entre 10 y 12 unidades y densidad en masa de 1100 Kg/m³ aproximadamente.

7.1.2.4. Aceite sulfonado

Se trata de un producto líquido que incorporado en pequeños volúmenes a suelos naturales mejora sus propiedades físicas y reduce el esfuerzo de compactación. Se emplea en suelos naturales conteniendo arcillas, sedimentos y materiales cuarcíticos. Se aplica predominantemente en la construcción de caminos de todo tipo para la estabilización de bases y subbases, playones de estacionamiento, taludes, represas, puertos, aeropuertos, etc. También aumenta la capacidad

portante formando una capa más impermeable que puede esperarse en el caso de un suelo no tratado.

EL producto diluido y aplicado al suelo se biodegrada y no tiene efectos contaminantes para las plantas, animales o las napas inferiores. Las salpicaduras en ojos, piel o ropa del producto concentrado, deben lavarse con abundante agua. El producto concentrado debe manipularse con guantes. Este aceite sulfonado se caracteriza por ser un producto líquido de color verde, pH igual a 1 unidad, viscosidad entre 300 y 386 cps y densidad de 1,10 g/cm³.

7.1.2.5. *Enzima*

Se trata de una enzima orgánica diseñada para fortalecer y unir la superficie de las carreteras sin pavimentar mediante el aumento de la densidad después de la compactación. Como resultado de este aumento de densidad, el suelo tratado muestra mejoras en los valores de CBR y un reducido potencial de hinchamiento, y por lo tanto, una superficie de carretera más duradera durante el clima húmedo.

El producto tiene la capacidad de estabilizar las carreteras con el tráfico de camiones de transporte pesado, pero también es una gran solución de ahorro de costes para la estabilización de carreteras secundarias y caminos municipales con mucho menos cargas de tráfico.

Se biodegrada en 28 días, es considerada no-perjudicial por todas las vías de exposición. El contacto con la piel puede provocar una irritación leve, igualmente en los ojos.

Se caracteriza por sus propiedades enzimáticas y combinación de electrolitos y agentes tenso-activos, que funciona por la liberación de agua del suelo, permitiendo ser compactado para obtener una forma más densa, y a continuación manipula la arcilla para aglutinarla de forma permanente, aumentando su resistencia y densidad.

7.1.2.6. *Polímero*

El producto es una emulsión de polímeros de acetatos vinílico acrílicos formulada especialmente para la estabilización de suelos, el control de las emisiones de polvo y el control de la erosión y pérdida de sedimento.

Esta emulsión aumenta la capacidad portante en cualquier tipo de superficies y suelos, estabiliza la superficie para resistir roturas por desplazamiento, desintegración y hundimiento,

evita que el agua penetre y desestabilice la superficie, es incoloro al secarse y resiste el viento, la lluvia, la luz UV y otras condiciones climáticas.

La efectividad de este estabilizante se debe a la longitud y fuerza de las moléculas de polímero y su capacidad para adherirse a materiales superficiales.

El polímero cumple con los reglamentos y normativas medioambientales. No es tóxico, ni corrosivo y no es inflamable. Como aditivo químico es líquido, de color blanco lechoso, diluible en agua, pH entre 4,0 y 9,5 unidades y con densidad entre 1,04 y 1,15 g/cm³.

7.1.2.7. Organosilano

Se trata de un aditivo químico formado 100% por un organosilano cuaternario, que únicamente contiene cadenas hidrocarbonadas en su estructura. Esto supone que el producto solamente posee en su composición los elementos siguientes: carbono, hidrógeno, oxígeno y silicio; elementos de mayor abundancia en la naturaleza. Se comporta como un agente impermeabilizante de suelos y además mejora la capacidad portante de los mismos hasta en un 50%.

El producto posee en su estructura grupos silanol (Si-OH), que reaccionan con el silicio presente en el suelo, originando la formación de enlaces de tipo siloxano (Si-O-Si), y generando así una membrana hidrófoba y transpirable sobre el suelo, de donde se puede decir que el impacto ambiental sobre el suelo es mínimo o nulo.

SU viscosidad varía entre 100 y 500 cps, es de color rojizo pálido y su densidad es de 1,04 g/ml aproximadamente.

7.2. Métodos

7.2.1. Ensayo de proctor estándar

Para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria se realizó el *Ensayo Normal de Compactación basados en la norma I.N.V. E – 141 del INVÍAS*. Para la compactación del suelo se utilizó un molde metálico con volumen de 944 cm³ y 116.4 mm de diámetro, y un martillo de 10 lb que cae de una altura libre de 45.72 cm. El suelo compactado fue pasante del tamiz N.4 y se dividió en tres capas que se compactaron con el martillo a 25 golpes cada una. Una vez terminado el proceso se pesa la muestra compactada y se determina la humedad. Este proceso se repite varias veces hasta observar un comportamiento de ascenso inicial y seguidamente descenso de la masa

compactada, formando así un tipo de parábola. Finalmente se determina la humedad óptima para el máximo peso unitario obtenido.

7.2.2. Compactación de muestras

La realización de las probetas compactadas se basó en la norma INV E-152-07 *Compresión Inconfinada en Muestras de Suelo*, de donde se determinaron las dimensiones del molde para las probetas, y la norma I.N.V. E – 141 – 07 *Ensayo Normal de Compactación*, de donde se calculó la energía de compactación para cada probeta. La compactación del suelo se realizó bajo las condiciones establecidas en el ensayo realizado del Proctor Estándar. Para la compactación del suelo se utilizó un molde metálico de 5 cm de diámetro interno y 10 cm de altura. La masa de compactación para cada espécimen se distribuyó en 5 capas que se compactaron utilizando un martillo de 1 Kg de masa ubicado a una altura de 32 cm con respecto al suelo a compactar. Luego de realizada la probeta se midió el diámetro, la altura, la masa y se tomó una muestra de suelo para determinar la humedad. Finalmente se verificó que la probeta cumpliera con la masa unitaria seca máxima y humedad óptima, previamente establecidas.

7.2.3. Compresión Inconfinada en muestras de suelo

El ensayo a la compresión simple para muestras no confinadas se realizó con base en la norma INV E-152-07 *Compresión Inconfinada en Muestras de Suelo*. El ensayo se llevó a cabo utilizando un Aparato de Compresión, modelo HM-3000.3F y número de serie 14041059. Inicialmente, para cada probeta aditivada, se midió la altura, el diámetro y la masa. Seguidamente se colocó en la prensa de modo que quedara perfectamente centrada y se accionó el equipo a condiciones preestablecidas de velocidad y carga. Finalmente se registró el valor máximo de la carga soportada por la probeta, el desplazamiento asociado a dicha carga, se hizo un esquema de la forma de la rotura y se tomó una muestra del espécimen para la determinación de la humedad.

7.2.4. Prueba de Envejecimiento Acelerado

Una vez terminada la compactación de las muestras se dejaron curando durante 7 días en bolsas herméticas en el laboratorio. Seguidamente fueron sometidas a la cámara de intemperismo QUV-SPRAY/240 con base en la norma ASTM G154 “*Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials*”. Las probetas realizadas

se analizaron pasadas 216 y 540 horas en la cámara QUV. Las condiciones de operación fueron las siguientes: 8 horas de luz UVA a 1,55 W/m²/nm y 60°C seguidas de 4 horas de condensación a 50°C.

7.2.5. Práctica estándar para la extracción de residuos sólidos con agua

Esta práctica cubre un procedimiento de lixiviación de desechos sólidos para obtener una solución acuosa que se utilizó para determinar los componentes lixiviados bajo condiciones de pruebas específicas. El equipo utilizado fue una Cámara de Lixiviación diseñada por el grupo de investigación con base en la norma ASTM D3987-12 *Standard Practice for Shake Extraction of Solid Waste with Water*. En la Imagen 2 se presenta una imagen de la cámara. Esta cámara se compone de un motor eléctrico al que se le puede graduar su velocidad angular, seis botellas plásticas con capacidad de dos litros cada una y una caja de madera contenedora de los recipientes.



Imagen 2. Cámara de lixiviación

La extracción del lixiviado se realiza directamente de las probetas aditivadas y sin aditivar, sometidas a la cámara de intemperismo QUV y a las condiciones de laboratorio previamente mencionadas. Para el ensayo se tomaron 100 g de suelo y se agregaron al recipiente con un volumen de agua reactiva (agua tipo IV) igual en mililitros a 20 veces la masa en gramos de la muestra de suelo agregada (2000 ml de agua). Luego se dispuso la cámara para agitar cada muestra durante $18 \pm 0,25$ h a 21 ± 2 °C y 29 ± 2 rpm. Pasado el tiempo de agitación se dejó asentar la muestra por 5 min; y después se separó la mayor parte de la fase acuosa de la fase sólida mediante filtración a través de un papel de filtro grueso. Finalmente se mide el pH del agua filtrada y se conserva para los análisis a realizar

7.2.6. Potencial de hidrógeno (pH)

Para medir el grado de acidez o basicidad de cada una de las muestras lixiviadas se midió el pH utilizando un Multiparámetro Hach modelo Hq40d.

7.2.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

De cada una de las muestras lixiviadas se tomaron 100 ml de lixiviado para determinar la DQO. El método implementado fue el Reflujo cerrado-Colorimétrico. Las muestras se preservaron con ácido sulfúrico hasta obtener un pH inferior a 2 unidades y se refrigeraron a 4°C hasta su respectivo análisis. Para los reactivos se preparó inicialmente la solución de digestión utilizando agua (H₂O), dicromato de potasio (H₂Cr₂O₇), ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) y sulfato de mercurio (HgSO₄). Seguidamente se preparó el reactivo de ácido sulfúrico usando sulfato de plata (AgSO₄) y ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). Como materiales se utilizaron tubos de ensayo, termoreactor Spectroquant® TR 420, espectrofotómetro Jenway UV/VIS modelo 6405 configurado con longitud de onda de 600 nm y demás elementos de laboratorio necesarios.

7.2.8. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Para determinar la DBO se tomaron 1000 mL de cada muestra lixiviada. El método utilizado fue el método Winkler. Las muestras fueron refrigeradas a 4°C durante el tiempo de almacenamiento. Se preparó agua de dilución utilizando agua de abastecimiento aireada, semilla o inóculo a base de bacterias liofilizadas, macronutrientes (Buffer de fosfato) y micronutrientes (sulfato de magnesio, cloruro de calcio, cloruro férrico y cloruro de amonio). Para el desarrollo del proceso se utilizaron botellas winkler de 300 mL con tapa de vidrio, una balanza digital, bombas aireadoras, una Incubadora Refrigerada Thermo Scientific Precision™ controlada termostáticamente a 20± 1°C y protegidas de la luz para prevenir la producción de oxígeno por fotosíntesis, y un multiparámetro Hach, modelo Hq40d, para la medición de oxígeno disuelto inicial y final del blanco y las muestras.

7.2.9. Carbono Orgánico Total (COT)

De cada muestra lixiviada se tomaron 400 mL. Para el análisis se utilizó el método de combustión a alta temperatura. Las muestras se acidificaron con H₂SO₄ hasta obtener un pH inferior a 2 unidades y se mantuvieron a 4°C durante el tiempo de traslado al laboratorio. Dentro

de los reactivos se incluye agua destilada como agua de reactivo con un valor de COT inferior a 2 MPP, ácido fosfórico al 21 % y gas portador (oxígeno purificado). Las mediciones fueron realizadas con un Analizador de Carbono Orgánico Total marca Tekmar Teledyne.

7.2.10. Biodegradabilidad

Para estimar la biodegradabilidad se utilizó la relación DBO/DQO, donde las relaciones superiores a 0,4 se asocian con aguas biodegradables (material orgánico), mientras que las aguas con relaciones inferiores a 0,2 (material inorgánico), son básicamente no biodegradables.

7.2.11. Prueba de Desgaste

El proceso llevado a cabo en la prueba de desgaste se realizó con base en la norma ASTM D 559-96 y TM -UCB- PRC 2003-2A. El ensayo se realizó para cada una de las probetas curadas durante 20 días en laboratorio a condiciones estándar de presión y temperatura. Se utilizó un cepillo mecánico de desgaste con una sobrecarga de 3 Kgf. Antes del ensayo las probetas se secaron en horno durante 24h a 60°C. Seguidamente, cada espécimen fue sometido a 4 repeticiones de 480 ciclos cada una, donde cada ciclo corresponde a un giro de 360° sobre la probeta en contacto de un cepillo de cerdas metálicas, a una frecuencia de 60 rpm. Después de cada una de las 4 repeticiones se midió el diámetro, la masa de la probeta y la masa de desgaste mediante la diferencia entre la masa inicial y final de la probeta.

7.2.12. Composición Química

Una vez terminada la prueba de desgaste se tomaron 10 g del material resultante de cada una de las 8 muestras para la determinación de elementos mayoritarios, tales como SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ total, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅ y *materia orgánica por ignición*. El método utilizado fue el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX) mediante el equipo Thermo ARL Optim'X WDXRF. La FRX es un método de emisión atómica que permite medir la longitud de onda y la intensidad de los rayos X emitidos por átomos energizados en la muestra. En este método la irradiación del haz de rayos X primario, procedente de un tubo de rayos X, provoca la emisión de rayos X fluorescentes con energías discretas que caracterizan los elementos presentes en la muestra.

7.2.13. Análisis de Tamaño de Partícula (ATP)

Para la realización de este análisis se tomaron 2 g del material resultante de cada muestra en la prueba de desgaste. El ensayo se realizó con la ayuda del equipo Mastersizer 2000E modelo Single Narrow y accesorio Hydro 2000 (MU)A. Se utilizó la técnica de difracción láser para medir el tamaño de las partículas. Esta se lleva a cabo midiendo la intensidad de la luz que se dispersa cuando un haz del láser pasa a través de una muestra de partículas dispersadas. Entonces, esta información es analizada para calcular el tamaño de las partículas que crearon el patrón de dispersión.

7.2.14. Prueba de Ascenso Capilar

Para el desarrollo de esta prueba se realizaron igualmente probetas con base en los parámetros de densidad máxima seca y humedad óptima, obtenidos en la prueba del Proctor Estándar, donde a diferencia de los espécimens realizados anteriormente estos tenían una altura de 5 cm. Luego de realizada cada probeta se dejaron en un horno a 40 °C durante 48 h. Una vez pasado este tiempo se retiraron del horno, se registró masa y dimensiones y se sometieron a la prueba de ascenso capilar. Se dispuso inicialmente de un contenedor de agua en el que se sumerge un material poroso de 2.5 cm de altura y área superficial lo suficientemente amplia como para contener la probeta realizada. Seguidamente se adicionó agua en el contenedor hasta la altura del material poroso, sobre el cual se colocó un papel filtro con el propósito de retener el material que posiblemente se desprendiera de la probeta. Finalmente se dispuso la probeta sobre el papel filtro y durante intervalos de tiempo se midió la altura que había ascendido el agua y la masa de la probeta correspondiente a dicha altura. Con los resultados obtenidos para cada probeta estabilizada se determinó tiempo total de saturación, masa de suelo desprendido, porcentaje de hinchamiento, velocidad de ascenso capilar y caudal de saturación.

8. Resultados y análisis

8.1. Caracterización del suelo

8.1.1. Lugar de extracción del suelo de estudio

El suelo seleccionado fue tomado de la vía terciaria Valencia – Villanueva, ubicada en el municipio de Valencia, Córdoba, Imagen 3. El suelo se extrajo directamente de la vía en el marco del Proyecto Piloto Valencia en el cual participaron el Ministerio de Transporte, el Invías, la

Gobernación de Córdoba, la Alcaldía de Valencia, la cooperativa vial COOVICOM APC y la Universidad de Antioquia. Inicialmente el suelo se caracterizó a simple vista como una arcilla homogénea, de color pardo rojizo con una consistencia aparentemente dura para las condiciones iniciales de humedad y densidad. El suelo fue igualmente caracterizado y clasificado en el laboratorio, donde se evaluaron diferentes parámetros bajo las normas establecidas. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

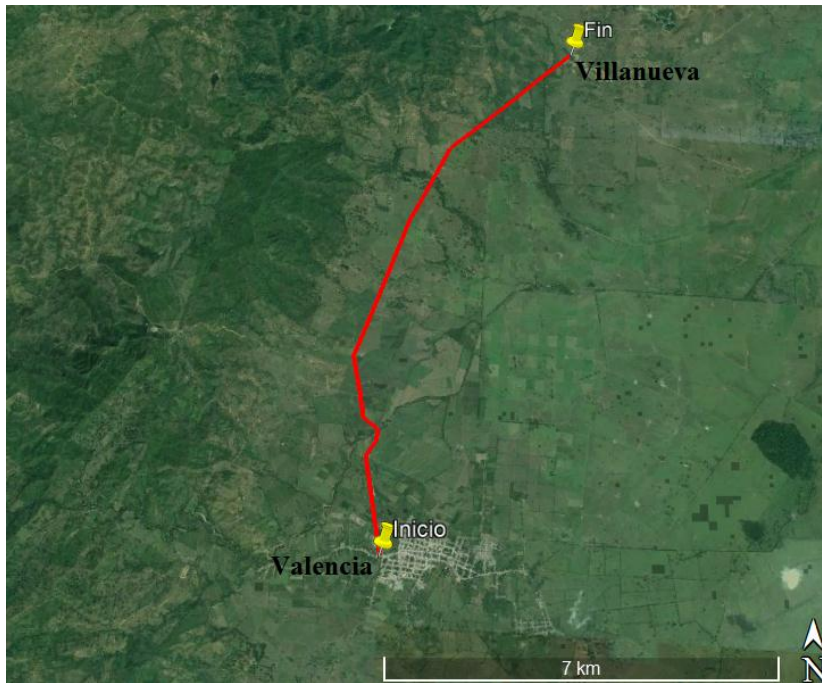


Imagen 3. Ubicación de la extracción del suelo de estudio.

Fuente: Google Earth.

Tabla 3. Resultados de ensayos de caracterización realizados al suelo natural.

Descripción	Color	Pardo Rojizo
Clasificación	SUCS	CL
	AASTHO	A-7-6(13)
Límites de Atterberg	L.L	43
	L.P	22

	I.P	21
Proctor Modificado	Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.626
	Humedad óptima (%)	22
CBR	100% de compactación	8
	Expansión (%)	1.09
Otros parámetros	LOI (%)	3.49
	Contenido de sulfatos (mg SO ₄ /G)	0.48
	pH a 22 °C	6.07
	Conductividad (μS/cm) a 21.6 °C	151.4
	Peso unitario seco máximo (kN/m ³)	15.95

8.2. Proctor Estándar

Inicialmente el suelo natural se encontraba a una humedad del 5%, por lo que no fue necesario el secado de la muestra al considerar que, por experiencia de previos estudios, la humedad óptima sería significativamente mayor a este valor inicial.

Los resultados obtenidos del ensayo del Proctor Estándar para cada producto estabilizante evidencian un aumento considerable, con respecto al suelo sin estabilizar, de la densidad máxima seca en las muestras aditivadas con Aceite Sulfonado. Esto se debe a que el Aceite sulfonado tiene la capacidad de reducción de agua que hay entre las partículas de suelo, lo cual hace que los espacios intersticiales sean menores y las partículas se puedan reacomodar en un espacio menor, esto por medio de la compactación. Igualmente se evidencia aumento de la densidad máxima seca en el suelo estabilizado con Enzima, gracias a que la enzima utiliza el material fino de la arcilla como ligante, permitiendo de este modo una mayor aglomeración entre las partículas. De igual modo sus propiedades enzimáticas permiten una fácil liberación del agua contenida en las partículas de la arcilla y consecuentemente una mayor compactación.

Sin embargo para el resto de estabilizantes la densidad máxima seca se mantiene relativamente constante, como es el caso del organosilano y el polímero lo cual puede ser un indicador de que la acción de estos productos en el suelo no se manifiesta de manera inmediata, e inclusive desciende un poco. Por ejemplo, para el caso particular del Cemento, la Cal y la Zeolita, el objetivo principal no es densificar el suelo, sino mejorar otras propiedades como la capacidad portante, la plasticidad, la resistencia al corte, entre otras. Estos productos químicos tienen reacciones similares con el suelo, lo cual se evidenció por ejemplo en la textura del suelo, que pasó estado arcilloso a un estado aparente más granular, generando consecuentemente gránulos mayores en el suelo y seguidamente una menor densidad con respecto al suelo sin aditivar.

Por otro lado, la humedad óptima disminuyó para los diferentes sistemas aditivados, excepto para el polímero que se mantuvo igual a la del suelo natural, esta disminución en la humedad óptima entre el 1 y 2% respecto a la muestra sin aditivo químico, aunque a escala de laboratorio no parezca ser muy significativa, es un aporte importante de los aditivos y se traduce en un ahorro del recurso hídrico en el momento de un proceso constructivo. Cabe resaltar que para las probetas aditivadas con productos que comercialmente tienen una alta concentración, como la Enzima utilizada, se hizo una dilución del producto con fines prácticos, por tanto la cantidad de agua utilizada para obtener la humedad óptima estaba incluida dentro de la dilución realizada.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la densidad máxima seca y la humedad óptima obtenidos para cada una de las muestras de suelo aditivado, las cuales se obtuvieron de los ensayos de Proctor Estándar realizados. Igualmente, en la Gráfica 1 se presenta a modo de ejemplo una de las curvas obtenidas en el ensayo del Proctor Estándar, donde se relaciona el peso unitario seco con las humedades obtenidas.

Tabla 4. Densidad seca máxima y humedad óptima para cada probeta estabilizada químicamente.

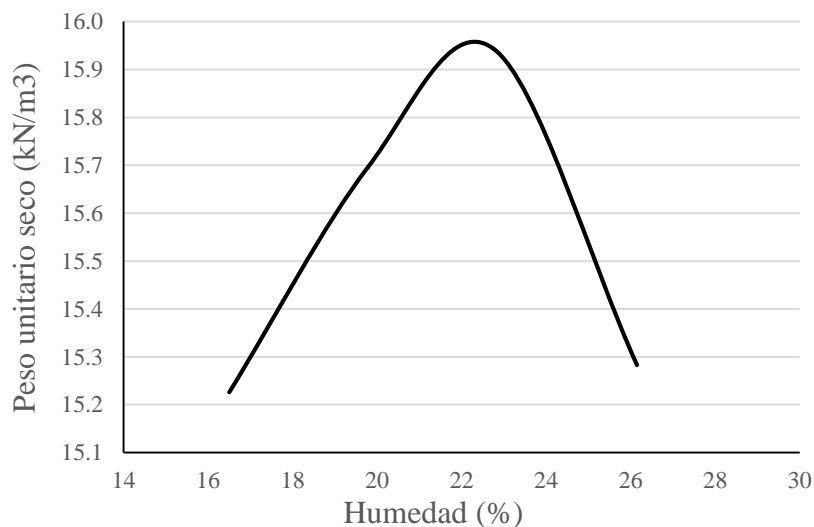
Proctor Estándar		
Muestra	Densidad seca máxima (Kg/m³)	Humedad óptima (%)
B00	1626	22
C00	1624	20
L00	1621	20

R00	1624	20
A00	1647	21
E00	1635	20
P00	1624	22
S00	1614	20

Leyenda:

B00: Suelo natural, **C00:** Suelo estabilizado con Cemento, **L00:** Suelo estabilizado con Cal, **R00:** Suelo estabilizado con Zeolita, **A00:** Suelo estabilizado con Aceite sulfonado, **E00:** Suelo estabilizado con Enzima, **P00:** Suelo estabilizado con Polímero, **S00:** Suelo estabilizado con OrganoSilano.

Nota: A lo largo del documento se presenta la misma nomenclatura, donde la única varianza son los números que acompañan a cada letra (número de probeta).

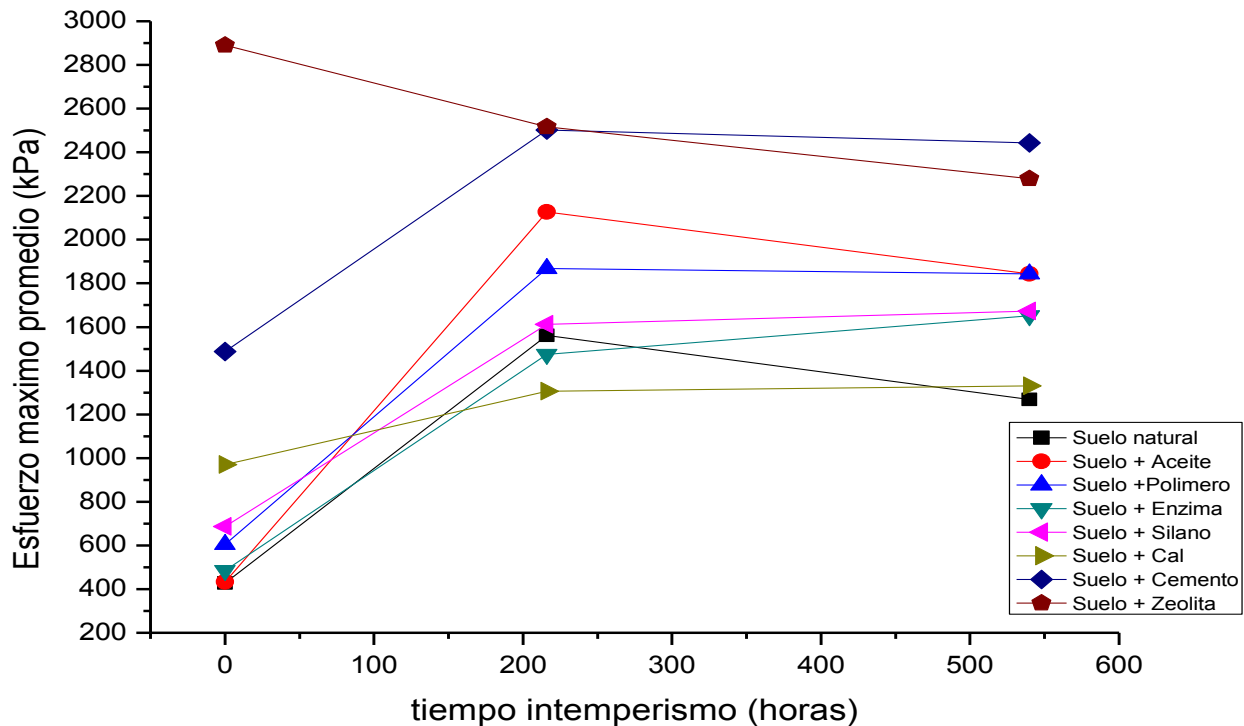


Gráfica 1. Relación entre el peso unitario seco y la humedad para la muestra de suelo sin estabilizar.

8.3. Compresión Inconfinada

La resistencia a la compresión simple se evaluó sobre tres especímenes para cada estabilizante. El ensayo de compresión se llevó a cabo para la primera probeta inmediatamente después de realizada. La segunda y la tercera se sometieron a la cámara QUV durante 2016 y 540 h, respectivamente. Pasados estos tiempos se sometieron igualmente a la prueba de compresión.

Los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 2, de donde se evidencia en general una mayor resistencia a la compresión en los suelos estabilizados, comparados con el suelo natural. Igualmente se destaca la relación directamente proporcional entre el esfuerzo soportado y el tiempo, principalmente entre los dos primeros tiempos evaluados. Esto se da igualmente para el suelo sin estabilizante. La razón de este fenómeno se debe al curado de las muestras, a la pérdida de humedad y consecuentemente al tiempo de exposición en la cámara. Dependiendo del producto estabilizante la velocidad de reacción entre el suelo y el aditivo varía. En este trabajo no se hace un estudio profundo de esta variabilidad en cada suelo estabilizado, sin embargo en la gráfica mencionada se puede observar que pasadas las 216 h, en la cámara QUV, la resistencia a la compresión simple tiende a estabilizarse en su máximo valor. Igualmente se nota que para la mayoría de las probetas hay una leve pérdida del esfuerzo con el pasar del tiempo. Esto se debe a la degradación del suelo por efectos de intemperismo simulados por la cámara, perdiendo así propiedades mecánicas.



Gráfica 2. Resistencia a la compresión para el suelo natural y estabilizado sometido a diferentes tiempos de intemperismo.

8.4. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH de las muestras de estudio se mantuvo relativamente constante a largo de los diferentes tiempos de exposición para cada una de las probetas aditivadas. Sin embargo, como se observa en la Tabla 5, se presentó una leve disminución del pH para cada muestra a lo largo del tiempo, hasta alcanzar un valor relativamente cercano al del suelo sin aditivar, excepto para las muestras aditivadas con Cemento, Cal y Zeolita que presentaron soluciones básicas. Esto se debe a que estos estabilizantes se caracterizan químicamente por tener altos contenidos de óxido de calcio, lo cual genera altos valores de pH.

Tabla 5. Resultados de pH para cada muestra sometida a diferentes tiempos de intemperismo.

Estabilizante	Curado 7 días laboratorio	Cámara QUV 216 h	Cámara QUV 540 h
Blanco	5.30	5.40	5.23
Enzima	5.51	5.78	5.17
Aceite Sulfonado	5.64	4.94	4.94
Terrasil	5.34	5.00	4.71
Polímero	6.95	4.68	4.43
Cal	12.06	11.39	12.10
Cemento	11.13	11.53	11.36
Zeolita	11.74	11.36	11.29

8.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

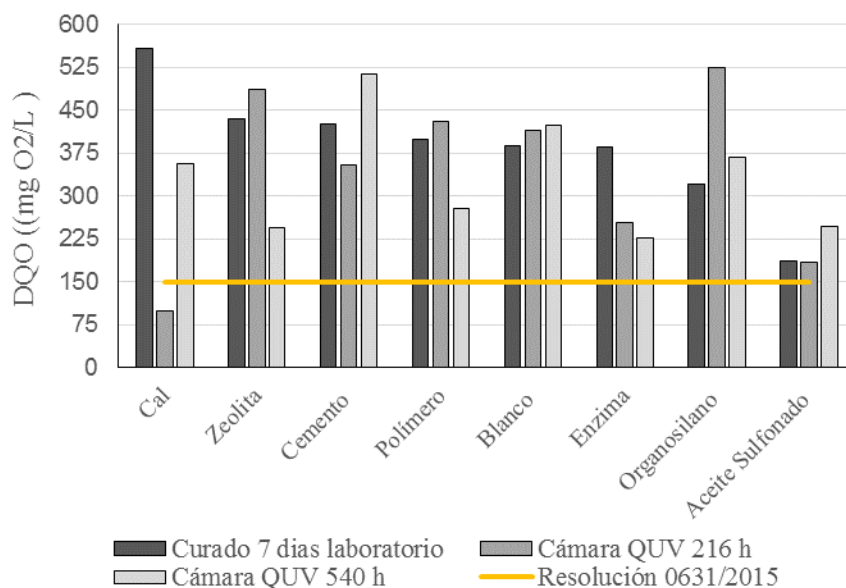
De la extracción solido-liquido llevada a cabo en la cámara de lixiviación se tomaron dos muestras de agua, y de cada una se evaluó por duplicado la DQO, de donde finalmente se tomó la

media de los valores obtenidos o se descartaron valores atípicos. Este mismo procedimiento se llevó a cabo para la evaluación de la DBO y el COT.

En la Gráfica 3 se presentan los resultados de DQO para cada una de las muestras aditivadas y sometidas a los diferentes tiempos de intemperismo, e igualmente el valor máximo permisible (150 mg O₂/L) según la resolución 0631/2015. Se evidencia claramente que los valores obtenidos son mayores a los permitidos por la norma, sin embargo esto no quiere decir que el suelo de estudio, incluyendo las muestras aditivadas, estén presentando una afectación al medio por la carga de DQO. En primera instancia cabe aclarar que los referentes establecidos por la normatividad hacen alusión a los valores máximos permisibles sobre los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, destacando entonces que para los suelos tratados no se lleva a cabo un proceso de lixiviación durante la ejecución real de una obra.

Los altos valores de DQO obtenidos se deben justamente a la oxidación química de las sustancias orgánicas presentes en el suelo, lo cual es válido para el análisis de una muestra de agua con contenido de materia orgánica debido a la proporción de suelo agregada en el ensayo de lixiviación.

Con este ensayo lo que se avaluó entonces fue la variabilidad existente entre la DQO del suelo sin estabilizar y los sistemas aditivados, donde las diferencias de la concentración de oxígeno se presentan más hacia el rango inferior que superior, como lo muestra la Gráfica 3. Esto evidencia entonces que la estabilización de suelos no presenta un aumento de DQO con respecto a los estabilizantes utilizados y a los tiempos de intemperismo que fueron sometidos.

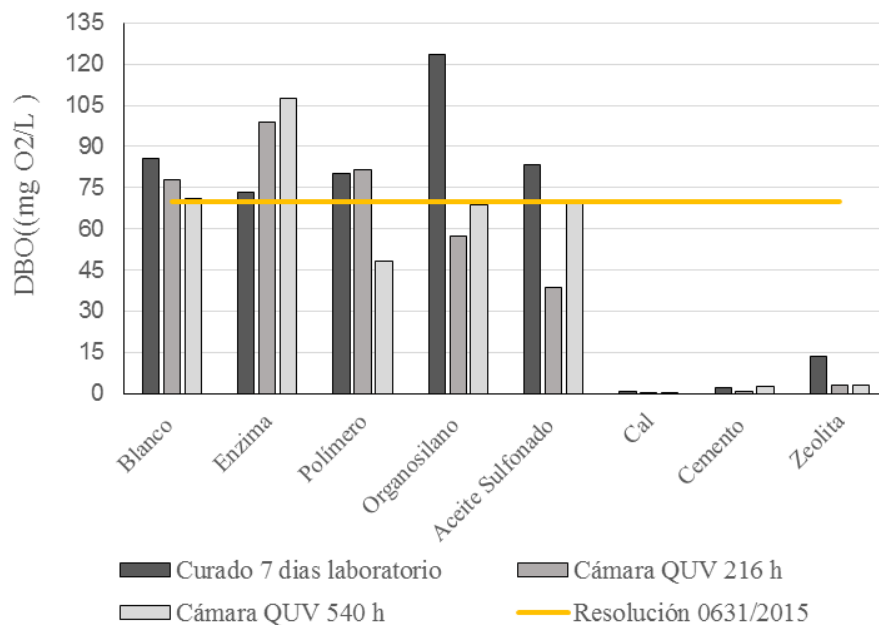


Gráfica 3. Resultados de DQO para cada muestra lixiviadaa después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.

8.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno se muestran la Gráfica 4, los cuales se comparan entre sí y con el valor máximo permisible (70 mg O₂/L) dictado por la resolución 0631/2015. Cabe aclarar que el análisis de este parámetro es semejante al presentado para la DQO, donde el objetivo principal no es regirse a la normatividad sino mostrar un estudio comparativo entre el suelo natural y las demás muestras aditivadas.

Se observa que la variabilidad existente entre el suelo natural, el valor exigido por la normatividad y los sistemas aditivados no es significativamente relevante, esto para los diferentes tiempos de exposición. Sin embargo para los productos estabilizados con Cemento, Cal y Zeolita la diferencia sí es notoria. Se concluye para este resultado que el contenido de CaO tuvo un efecto significativo en la precipitación de la materia orgánica contenida en la muestra, lo cual conlleva a una disminución de la demanda de oxígeno.



Gráfica 4. Resultados de DBO para cada una de las muestras lixiviadas después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.

8.7. Carbono Orgánico Total (COT)

Los resultados de carbono orgánico total muestran una relación directamente proporcional entre los tiempos de exposición y la concentración de COT, como se observa en la Tabla 6. Normalmente en materiales bajo condiciones naturales este aumento de carbono orgánico se debe a fuentes externas, como la industria agropecuaria. Sin embargo este no es el caso para las muestras de suelo estudiadas, pues durante todo el proceso de ensayo estuvieron aisladas del medio natural. Se cree entonces que el aumento del COT está relacionado directamente con la materia orgánica natural en descomposición. Este proceso se dio justamente durante el tiempo de intemperismo acelerado al que se sometieron las muestras, sufriendo así una descomposición acelerada de sus componentes.

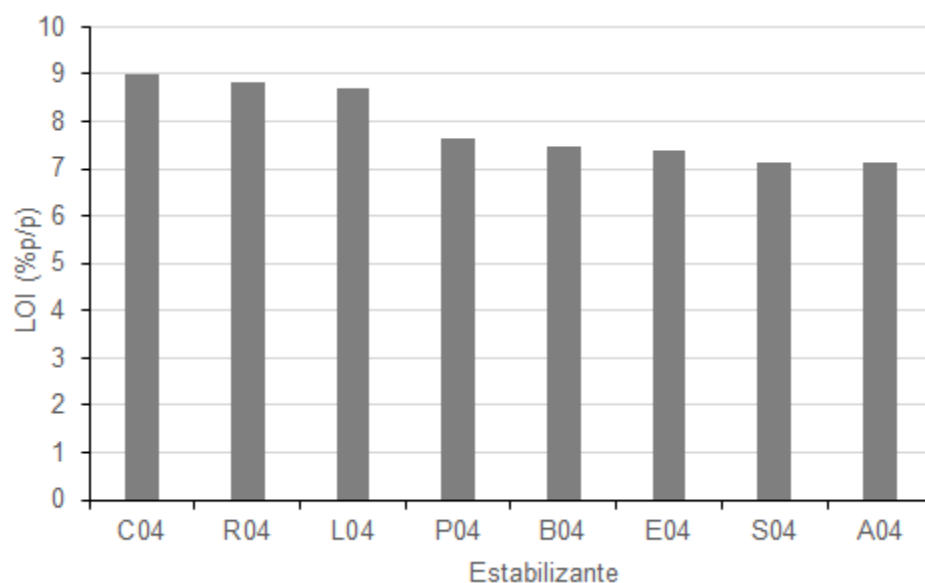
El valor de COT para agua potable normalmente se encuentra desde menos de 100 $\mu\text{g} / \text{L}$ hasta más 25 mg / L (American Public Health Association et al., 2017). Sí se comparan estos valores con los resultados obtenidos se puede establecer que se encuentran dentro de este rango. Esto se debe principalmente a la baja cantidad de materia orgánica que contienen las arcillas, como se puede evidenciar en la Gráfica 5. Se compara el COT con el LOI gracias a la alta correlación que hay entre estos parámetros.

Comparando los resultados obtenidos del suelo sin estabilizar con las muestras aditivadas se puede concluir que la diferencia no es significativa, sin embargo hay compuestos que incrementaron ligeramente este parámetro debido a la composición química de los estabilizantes.

Tabla 6. Resultados de COT para cada una de las muestras lixiviadas después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.

Estabilizante	COT (ppm)		
	Curado 7 días laboratorio	Cámara QUV 216 h	Cámara QUV 540 h
Blanco	7.15	13.81	16.30
Enzima	8.61	17.82	19.63
Aceite Sulfonado	10.69	19.80	20.15

Terrasil	6.51	15.05	15.31
Polímero	7.82	16.90	15.43
Cal	7.11	21.33	18.44
Cemento	22.58	11.74	18.00
Zeolita	11.57	18.91	19.35



Gráfica 5. Contenido de materia orgánica por ignición.

8.8. Biodegradabilidad

La Tabla 7 presenta las relaciones entre la DBO y la DQO, como parámetro de biodegradabilidad. Las relaciones mayores a 0,4 indican que el agua analizada es biodegradable, aquellas inferiores a 0,2 se consideran no biodegradables y para valores intermedios el agua es moderadamente biodegradable. En el sentido del tratamiento de aguas la biodegradabilidad da una idea del tipo de tratamiento que se debería implementar, ya sea biológico, químico o mixto. Los tratamientos biológicos son más amigables con el medio ambiente y menos costosos en comparación con los tratamientos químicos. Sí se tuviera que implementar un tratamiento de

acuerdo a los resultados obtenidos para este estudio se tendría que analizar cada caso particularmente, partiendo de un estudio más profundo donde se implemente un modelo matemático que correlacione estas dos variables de demanda de oxígeno.

Sin embargo, comparando los resultados obtenidos del suelo sin estabilizante con los suelos tratados, se puede decir que en general la biodegradabilidad de cada muestra no presenta una diferencia, y en caso de ser así la variación se da más hacia compuestos biodegradables que no biodegradables.

Tabla 7. Resultados de biodegradabilidad para cada una de las muestras lixiviadas después de someterse a los diferentes tiempos de exposición.

Estabilizante	Curado 7 días laboratorio		Cámara QUV 216 h		Cámara QUV 540 h	
	Relación DBO/DQO	Clasificación	Relación DBO/DQO	Clasificación	Relación DBO/DQO	Clasificación
Blanco	0.2209	MBD	0.1885	NBD	0.1680	NBD
Enzima	0.1898	NBD	0.3905	MBD	0.4762	BD
Aceite Sulfonado	0.2004	MBD	0.1900	NBD	0.1731	NBD
Terrasil	0.3853	MBD	0.1092	NBD	0.1871	NBD
Polímero	0.4464	BD	0.2097	MBD	0.2844	MBD
Cal	0.0011	NBD	0.0016	NBD	0.0004	NBD
Cemento	0.0044	NBD	0.0026	NBD	0.0051	NBD
Zeolita	0.0308	NBD	0.0062	NBD	0.0119	NBD

Leyenda:

BD: Biodegradable

MBD: Moderadamente biodegradable

NBD: No biodegradable

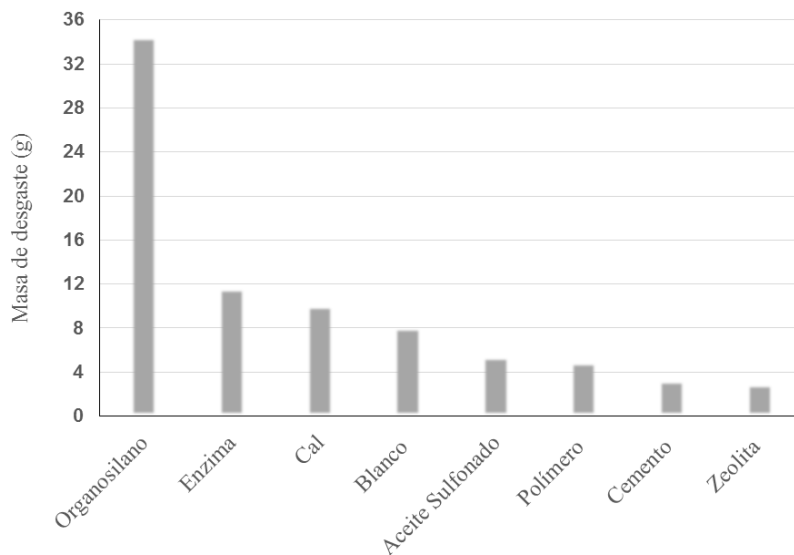
8.9. Prueba de Desgaste

La prueba de desgaste realizada a las probetas curadas durante 20 días en el laboratorio muestran resultados importantes, dando así una noción de la erodabilidad y la generación de material particulado que podrían tener los suelos tratados con estos estabilizantes.

En la Gráfica 6 se registra la masa de desgaste asociada a cada sistema aditivado. Evidentemente el suelo estabilizado con el Organosilano presentó un mayor grado a la erosión que el resto de estabilizantes. Otros estudios demuestran que los organosilanos mejoran significativamente propiedades como la permeabilidad y resistencia al agua; sin embargo, no aportan tanta resistencia al desgaste. Caben destacar los proyectos que se han realizado con Organosilanos desde el grupo de investigación Procesos Fisicoquímicos Aplicados, quienes recomiendan la aplicación de riegos superficiales, poliméricos o asfálticos como protección ante el desgaste superficial que pueden sufrir estos suelos a causa del tráfico.

Los aditivos que mejores resultados mostraron para este parámetro fueron el Cemento y la Zeolita. Estos productos se caracterizan por su alta capacidad cementante, lo que hace que se presente una mayor adhesión y cohesión entre las partículas, y consecuente una mayor resistencia a los agentes físicos y químicos.

La masa de desgaste presentada para el resto de aditivos se mostró relativamente cercana a la del suelo natural, de donde se puede decir que estos estabilizantes no influyen significativamente en susceptibilidad a la erosión ni a la posible generación de material particulado.



Gráfica 6. Masa de desgaste para cada probeta estabilizada.

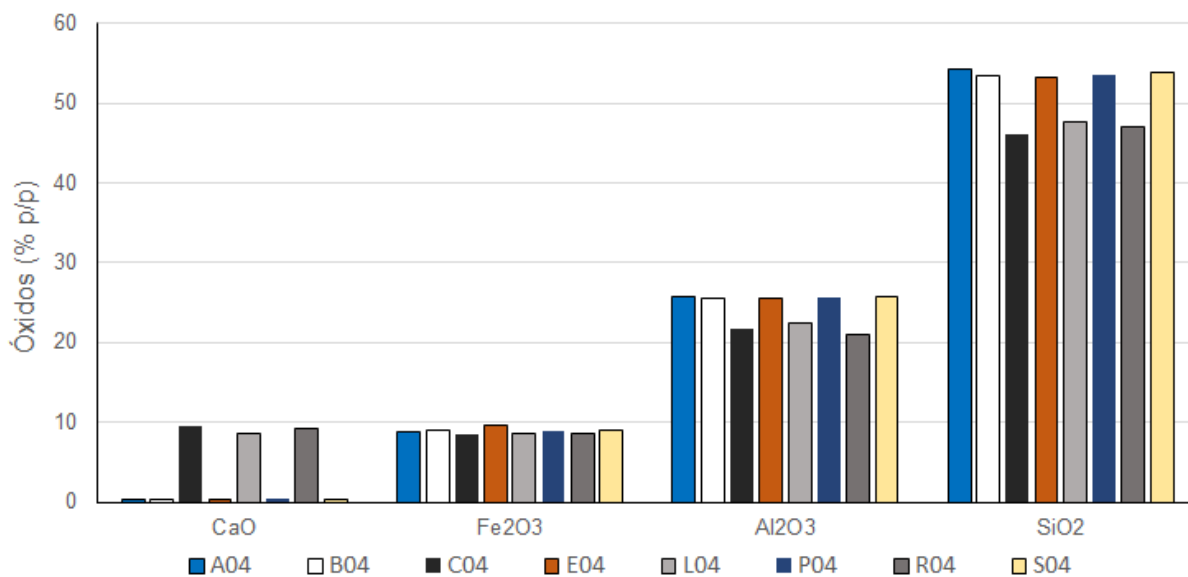
8.10. Composición Química

En las Gráficas 7 y 8 se presentan óxidos como SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ total, CaO, MgO, TiO₂, K₂O y Na₂O, caracterizados como elementos mayoritarios para el suelo estabilizado y sin

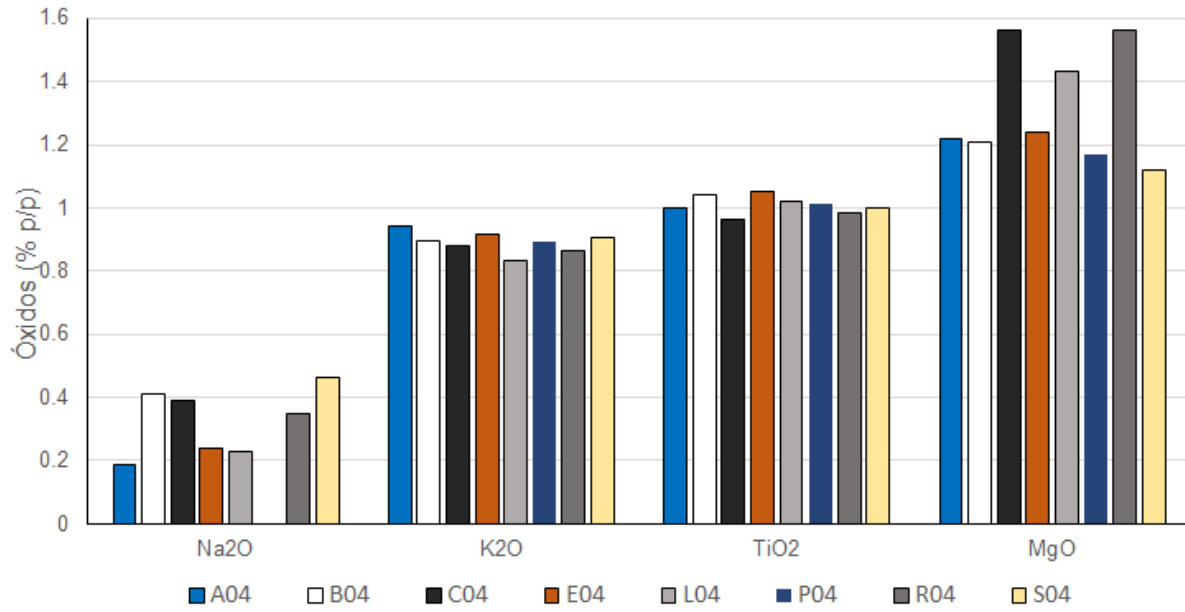
estabilizar. Por otro lado, en la Gráfica 9 se muestran elementos minoritarios como P₂O₅, P, MnO y BaO. Igualmente la composición química de estos suelos estabilizados mostró una lista mayor de compuestos, donde se incluían, por ejemplo, Cr₂O₃, ZrO₂ y V₂O₅, entre otros. Sin embargo no se muestran en su totalidad porque sus relaciones en % p/p fueron inferiores a 0.09.

Los silicatos son el grupo de minerales más abundantes en la tierra, y se presentan en una gran mayoría de suelos, así como en la arcilla de este estudio. El dióxido de silicio (SiO₂) constituye pues en % p/p más del 50% de la composición en la mayoría de especímenes analizados. De igual modo la alúmina (Al₂O₃) y el óxido de hierro (Fe₂O₃) completan aproximadamente el 85% de la composición química. Estos componentes son constituyentes básicos de las arcilla, por lo que no presentan ningún riesgo para el ser humano y el medio ambiente. Igualmente las bajas proporciones del resto de componentes no presentan toxicidad alguna para quien se exponga ante estos suelos estabilizados, sabiendo igualmente que estos óxidos son parte de la arcilla como tal.

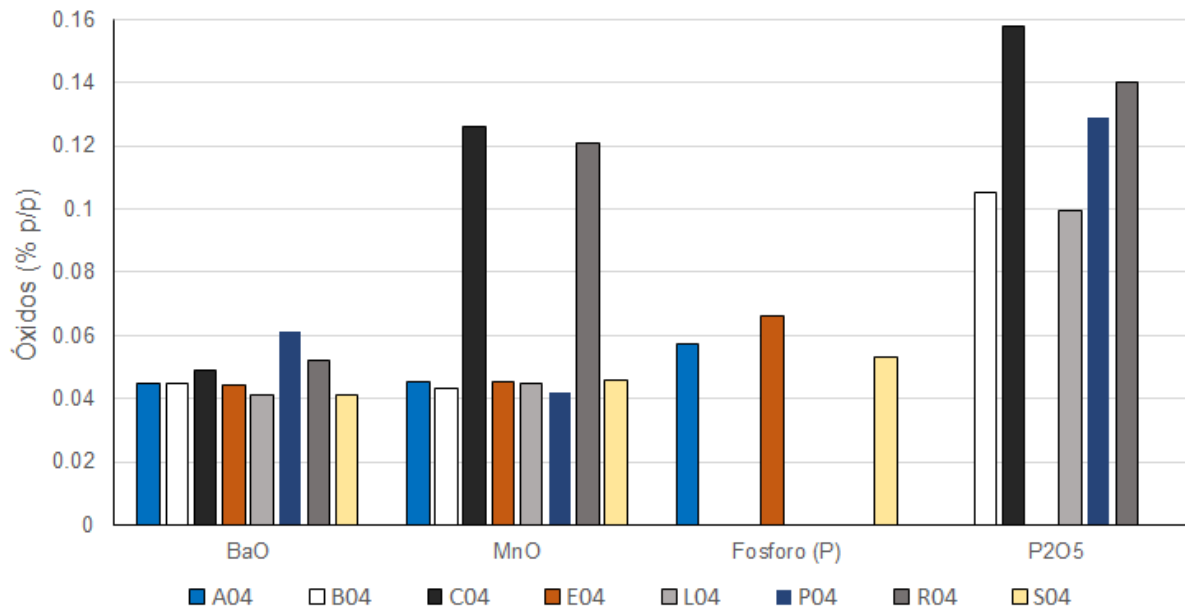
Comparando el suelo natural con los resultados obtenidos para el resto de muestras aditivadas, se puede decir que no hay diferencias importantes en la composición química, y tampoco se presentan posibles subproductos tóxicos para el medio ni aumentos considerables en algún componente, excepto para el óxido de calcio (CaO) y magnesio (MgO). El incremento de estos dos componentes se dio en los suelos tratados con Cemento, Cal y Zeolita, lo cual era de esperarse gracias a aporte de calcio y magnesio de estos estabilizantes. Igualmente esta leve diferencia con respecto al suelo natural no presenta ninguna afectación.



Gráfica 7. Composición química del suelo natural y estabilizado.



Gráfica 8. Composición química del suelo natural y estabilizado.



Gráfica 9. Composición química del suelo natural y estabilizado.

8.11. Análisis de Tamaño de Partícula (ATP)

En la Tabla 8 se muestran los resultados del análisis de tamaño de partícula por difracción láser, tanto para el suelo natural como para el suelo tratado, en función de los valores $D_{0.1}$, $D_{0.5}$ y $D_{0.9}$ utilizados comúnmente para describir las distribuciones de tamaño de partícula en este tipo de análisis. Se puede observar que en general hay un aumento de los tamaños de partícula de los materiales que incluyen aditivos respecto al valor de obtenido de estos índices en el suelo natural. Estos resultados ponen de manifiesto que los aditivos estudiados afectan la textura del suelo aumentando el tamaño de las partículas por mecanismos fisicoquímicos de aglomeración y adhesión.

Es de anotar que el tamaño de partícula está estrechamente relacionado, siendo inversamente proporcional, con propiedades como la porosidad y el área superficial de los materiales. De esta última se obtuvo un estimado de acuerdo con los reportes del equipo de difracción láser, de donde cabe decir que no es un dato muy preciso, sin embargo los datos se reportan con fines comparativos. Se observa entonces que esta variable presenta resultados menores para todos los sistemas aditivados en comparación suelo natural.

Tabla 8. Diámetros de partícula y área superficial para cada sistema aditivado.

Muestra	Diámetro de partícula (μm)			Otros parámetros		
	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$	Residual (%)	IR	Área superficial (m^2/g)
BO4	4.353	42.354	279.425	0.492	1.620	0.551
C04	6.926	71.036	335.978	0.494	1.620	0.391
L04	8.565	108.676	576.937	0.987	1.620	0.344
R04	7.597	98.580	467.545	0.481	1.620	0.357
A04	5.772	61.456	333.561	0.350	1.620	0.440
E04	4.627	45.874	246.646	0.435	1.620	0.528
P04	5.438	70.984	349.071	0.655	1.620	0.444
S04	6.850	85.191	309.267	0.743	1.620	0.373

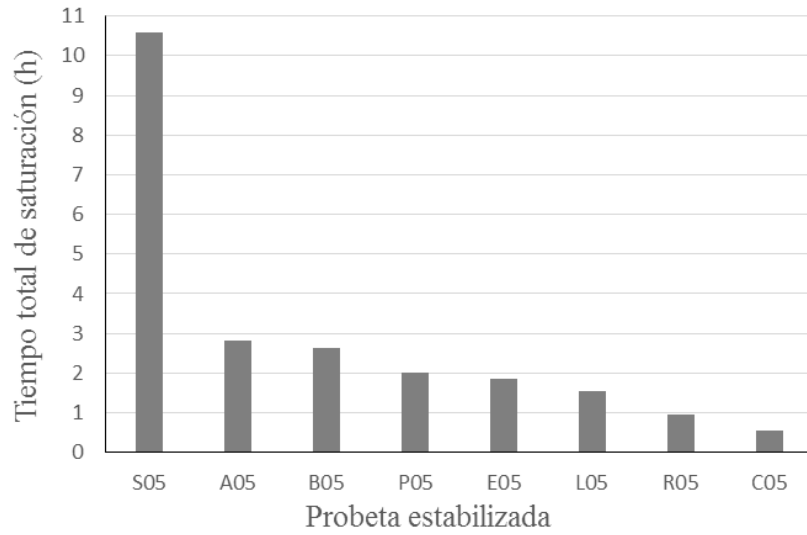
8.12. Ascenso Capilar

En lo que sigue se presentan los resultados de ascenso capilar obtenidos para cada espécimen; en lo que respecta al tiempo total de saturación, velocidad de ascenso capilar, caudal de saturación masa de suelo desprendido y porcentaje de hinchamiento.

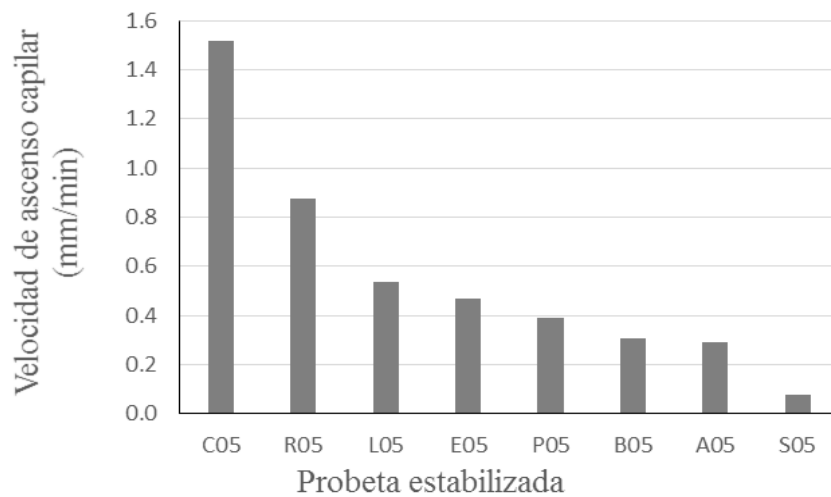
El tiempo que tomó cada probeta en saturarse completamente se presenta en la Gráfica 10, el cual es inversamente proporcional a la velocidad de ascenso capilar y al caudal de saturación, como se aprecia en las gráficas 11 y 12, respectivamente. El suelo estabilizado con Organosilano se destaca entre los demás por su elevado tiempo de saturación. Esto se debe a que las fuerzas de adhesión que actúan sobre los tubos capilares no son lo suficientemente altas como para tener una velocidad mayor comparada con el suelo natural y demás especímenes. Igualmente, así como lo explican (Rodríguez & del Castillo, 2009) los organosilanos contienen una larga cadena de alquilos, que es responsable de generar propiedades hidrofóbicas a la superficie tratada.

Por otro lado, las probetas aditivadas con Cemento, Cal y Zeolita continúan presentando similitudes, mostrando para este caso una gran facilidad para absorber agua en cortos periodos de tiempo. Esto se debe en parte a la explicación dada en el apartado 8.2 cuando se hablada de la relación entre estos estabilizantes y densidad máxima seca obtenida. La estabilización de suelos con estos productos cementantes hace que la distribución de los poros y su tamaño aparente se modifiquen, de modo que la estructura capilar presenta favorabilidad a la absorción de agua por ascenso capilar. Esta capacidad de absorción no es favorable en muchos casos, principalmente cuando el suelo tratado está expuesto a la intemperie o es susceptible al ascenso capilar de aguas subterráneas, como podría acontecer naturalmente en alguna infraestructura vial.

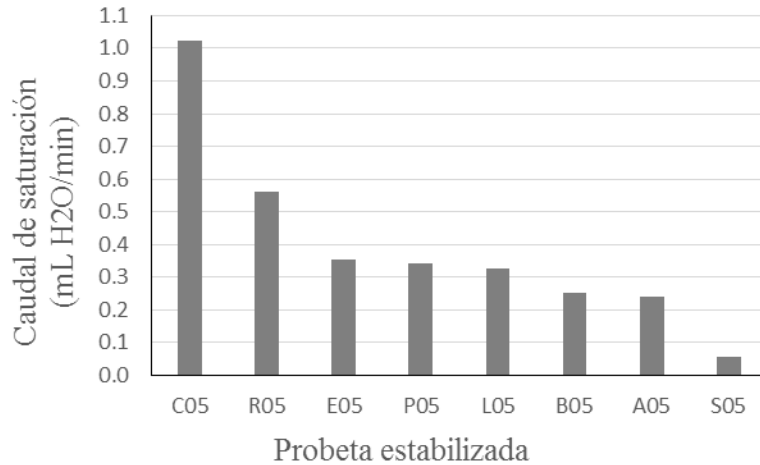
Para el resto de probetas aditivadas estos tres parámetros analizados presentan poca varianza con respecto al suelo natural.



Gráfica 10. Tiempo total de saturación para cada probeta estabilizada.

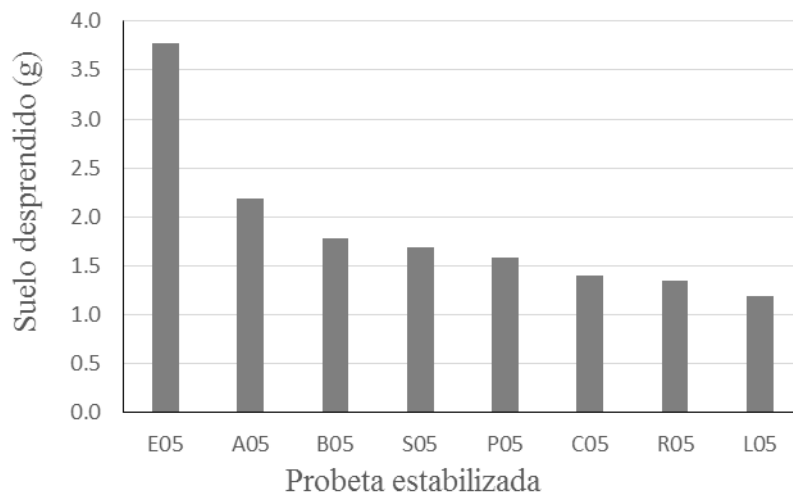


Gráfica 11. Velocidad de ascenso capilar para cada probeta estabilizada



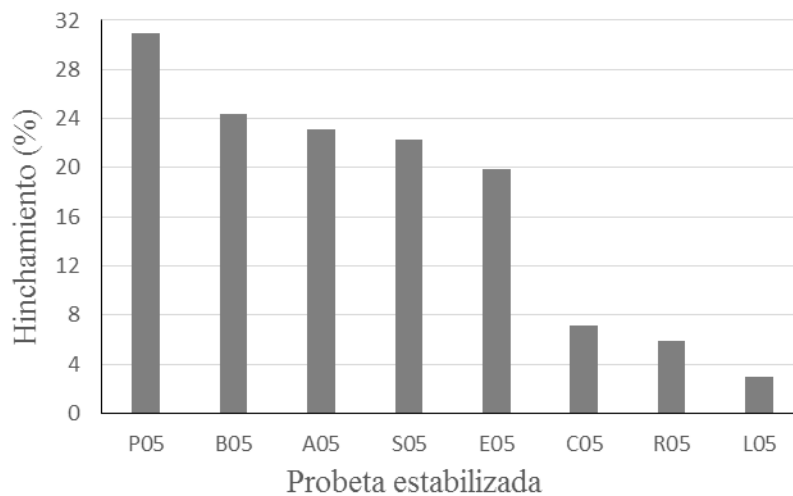
Gráfica 12. Caudal de saturación para cada probeta estabilizada.

Durante el desarrollo de la prueba de ascenso capilar se presentó desprendimiento de suelo al momento de registrar la masa de la probeta en ciertos intervalos de tiempo. Los resultados se muestran en la Gráfica 12. Tanto el Cemento como la Cal y la Zeolita presentaron los valores más bajos, debido justamente a las propiedades cementantes de estos compuestos. Igualmente la diferencia con respecto al suelo natural y demás estabilizantes no es significativamente mayor. Esto sin ignorar el resultado obtenido para el suelo tratado con Enzima, el cual tuvo un desprendimiento total de suelo igual a 3.78 g, a diferencia de la Cal que presentó un valor total de 1.19 g.



Gráfica 13. Masa de suelo desprendido para cada suelo estabilizado.

La variabilidad del porcentaje de hinchamiento se presenta en la Gráfica 13. El hinchamiento en las arcillas se da gracias a la absorción de agua entre los espacios laminares de las partículas de suelo, lo cual genera separación de las láminas y consecuentemente hinchamiento de la probeta. Los cationes que más favorecen el hinchamiento son los de sodio (Na^+), mientras que los que mejor “contrarrestan” esta propiedad son los cationes de calcio (Ca^{2+}) y (Mg^{2+}). Y efectivamente los suelos que menor porcentaje de hinchamiento presentaron fueron el Cemento, la Cal y la Zeolita, los cuales fueron favorecidos por la presencia de estos dos últimos cationes. Por otro lado, el suelo estabilizado que mayor porcentaje de hinchamiento presentó fue el polímero. Esto se atribuye a que el Polímero utilizado no tiene una alta cohesión con las partículas del suelo tratado, lo cual no permite una óptima compactación y consecuentemente una mayor posibilidad de contener humedad intersticial que favorece el hinchamiento. El resto de muestras tuvieron un porcentaje de hinchamiento cercano al suelo sin estabilizante.



Gráfica 14. Porcentaje de hinchamiento para cada sistema aditivado.

9. Conclusiones

Se valida la hipótesis planteada demostrando que los estabilizantes químicos evaluados no presentan peligrosidad para el ambiente en términos de toxicidad, biodegradabilidad y generación de material particulado; asimismo, se encontraron mejoras en propiedades ingenieriles del suelo tales como densificación y resistencia mecánica respecto al suelo natural.

En general, para todos los sistemas aditivados, se presenta una estabilidad entre parámetros como pH, COT, DQO, DBO y composición química, comparados con el suelo natural. Lo cual

indica que la estabilización de suelos con estos productos químicos no alteran considerablemente la matriz suelo en términos ambientales.

Aunque en este trabajo no se hace un estudio cuantitativo del material particulado que se podría generar en suelos estabilizados químicamente, la prueba de desgaste y el análisis de tamaño de partícula mostraron indirectamente una disminución de este parámetro. No obstante, cabe resaltar que el Organosilano presenta alta susceptibilidad a la generación de material particulado, por lo que se recomienda riegos superficiales, poliméricos o asfálticos como protección ante el desgaste superficial que pueden sufrir estos suelos a causa del tráfico vehicular.

Mecánicamente los suelos mostraron importantes mejoras con respecto al suelo natural. Los suelos que mayor resistencia presentaron ante el ensayo a la compresión Inconfinada fueron aquellos estabilizados con Cemento y Zeolita. Igualmente el resto de especímenes presentaron mayor capacidad de soporte de carga con respecto al suelo sin estabilizar, a excepción del suelo tratado con Cal que mostró fragilidad durante las pruebas.

En la capacidad de absorción de agua por capilaridad, el estabilizante que mejor respuesta dio fue el Organosilano, lo que se evidenció en el elevado tiempo de saturación, baja velocidad de ascenso capilar y bajo caudal de saturación. Esto se debe a que el Organosilano empleado generó propiedades hidrofóbicas a la superficie tratada. Por otro lado, quienes menos se favorecieron fueron los suelos estabilizados con Cemento, Cal y Zeolita, los cuales mostraron resultados significativamente diferentes con respecto al suelo natural, pero principalmente con respecto al suelo estabilizado con Organosilano. Esta propiedad no favoreció a estos tres estabilizantes, sin embargo se destacaron por presentar los menores porcentajes de expansión volumétrica (hinchamiento) y de desprendimiento de masa durante la realización del ensayo.

Este estudio permite concluir que el impacto ambiental generado por los aditivos químicos en aplicaciones de infraestructura vial no es significativo comparado con los procesos constructivos tradicionales y que estas tecnologías son alternativas viables desde perspectivas y enfoques de durabilidad y sostenibilidad ambiental.

Finalmente los resultados presentados en este trabajo están asociados a la necesidad de profundizar en el conocimiento de los fenómenos físicos, químicos y ambientales presentes en los procesos de estabilización química.

Bibliografía

- Agudelo, H., Hernández, A., & Cardona, D. (2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 15(1), 105-118.
- American Public Health Association, Water Environment Federation, & American Water Works Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater. American public health association. 5310 B. Total Organic Carbon (TOC)—High-Temperature Combustion Method*. <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.104>
- Anink, D., Cheil, B., & Mak, J. (1996). *Handbook of Sustainable Building: An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*. Earthscan Publications Ltd. <https://www.buildinggreen.com/newsbrief/handbook-sustainable-building-environmental-preference-method-selection-materials-use>
- Ayala Avellán, G. G. (2017). *Estabilización y control de suelos expansivos utilizando polímeros* [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Espíritu Santo]. <http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/1945/1/TESIS%20GENESIS%20AYALA.pdf>
- Benavides, D. I. H. (2016). *Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzimas orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub-rasante* [Trabajo experimental previo a la obtención del título de Ingeniero Civil]. Universidad Técnica de Ambato.
- Calderón, J., Prada, R., & Loyo, G. (2013). Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 43-53. <https://doi.org/10.22490/21456453.990>

- Camacho-Tauta, J., Reyes, O., & Mayorga, C. (2010). Efecto de la radiación UV en arcillas expansivas tratadas con aceite sulfonado. *Ingeniería y Competitividad*, 12(2), 41-50.
- Cedeño Plaza, D. G. (2013). *Investigación de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la Avenida Quitumbe—Ñan, Cantón Quito*. [Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2201>
- Chávez, C., & Karen, B. (2018). “*Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas, 2018*”. <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/25124>
- Conesa, V. (1997). *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental* (2.^a ed.). Mundi Prensa. http://centro.paot.mx/documentos/varios/guia_metodologica_impacto_ambiental.pdf
- Correia, A. A. S., & Rasteiro, M. G. (2016). Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization. *Procedia Engineering*, 143, 1252-1259. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.113>
- Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (1984). *Ingeniería química TOMO III*. Reverté.
- de Solminihac, H., Echeverría, G., & Thenoux, G. (1989). Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. *Revista de ingeniería de construcción*, 6, 24.
- Arrieta, F., & Obando, D. (2008). Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas.
- Espinosa, D. O. (2007). *Diseño y construcción de una cámara de envejecimiento acelerado por temperatura para polímeros*. Instituto Politécnico Nacional.

- Eulalio Juárez, B., & Rico Rodríguez, A. (1975). *Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la Mecánica de suelos*. Limusa.
<https://veteranos1927.files.wordpress.com/2014/05/mecanica-de-suelos-tomo-1-juarez-badillo.pdf>
- Fordyce, F. M., Guangdi, Z., Green, K., & Xinping, L. (2000). Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China. *Applied Geochemistry*, 15(1), 117-132. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00035-9)
- Galvín, R. M. (2012). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas: Teoría, práctica y problemas resueltos* (1.ª ed., Vol. 1). Díaz de Santos.
- Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361-371.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>
- Gutiérrez Montes, C. A. (2010). *Estabilización química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas comparativas del cloruro de magnesio (bischofita) frente al cloruro de calcio* [Informe para optar al título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Ricardo Palma].
http://cybertesis.urp.edu.pe/bitstream/urp/116/1/gutierrez_ca.pdf
- Jerez, L. D., Gómez, O. E., & Murillo, C. A. (2018). Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 639-646. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.06.001>
- Kushwaha, S. S., Kishan, D., & Dindorkar, N. (2018). Stabilization of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment. *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 3), 19667-19679. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.329>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2008). *Soil Mechanics Si Version*. Wiley India.

- López, G. D., & Ambrosini, M. S. (2013). *Nanotecnología aplicada a la estabilización de suelos: Factibilidad económica*.
https://www.academia.edu/25744811/NANOTECNOLOGIA_APLICADA_A_LA_ESTABILIZACION_DE_SUELOS_FACTIBILIDAD_ECONOMICA
- Lozada, H. (2006). *Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá* (Vol. 29). Universidad Nacional de Colombia.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-56092009000300028&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Martínez, W. (2014). Evaluación del impacto ambiental en obras viales. *Revista Negotium*, 0(29), 5-21.
- Morgan, P. (2018). Total organic carbon removal instrumentation. *Filtration + Separation*, 55(4), 32-34. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(18\)30299-4](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(18)30299-4)
- Orea, D. G., & Villarino, M. T. G. (2013). *Evaluación de impacto ambiental*. Mundi-Prensa Libros.
- Ortiz, O. J. R., Rivera, J. R. T., & Tauta, J. F. C. (2006). Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. *Ingeniería y Universidad*, 10(1), 19-30.
- Patel, A. (2019). *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01307-9>
- Peral, J., & Doménech, X. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres* (1.ª ed.). Reverté.
- Q-LAB. (2020). *Cámara de envejecimiento acelerado QUV // Q-Lab // Q-Lab*. QUV Accelerated Weathering Tester. <https://www.q-lab.com/es-es/products/quv-weathering-tester/quv>

- Quiroga, J. A. V., & López, F. E. D. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Revista de Tecnología - Journal of Technology*, 7(2), 21-28.
- Rineanu, G. C. (2016). *Definición de la metodología del test de biodegradabilidad bajo condiciones aerobias* [Máster Universitario en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos]. Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Rocha, M. T., & Rezende, L. R. (2017). Estudio laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(4).
<https://doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0229>
- Rodríguez, A. R., & del Castillo, H. (2009). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres (carreteras, ferrocarriles y aeropistas)* (Vol. 2). Limusa (Noriega Editores).
- Rodríguez Pardo, P. A. (2017). *Evaluación del potencial de suelos lateríticos (ripio) para obras de infraestructura vial en el Vichada* [Tesis como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Civil -Geotecnia]. Universidad Nacional de Colombia.
- Rodriguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008). *Treatment of industrial effluents of recalcitrant nature using ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation*. 46, 24-38.
- Sbarato, R. D., Sbarato, V., & Ortega, J. E. (2007). *Prediccion y evaluacion de impactos ambientales sobre la atmosfera/ Prediction and assessment of environmental impacts about atmosphere*. Editorial Brujas.
- Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., & Mirzababaei, M. (2017). A sulphonated oil for stabilisation of expansive soils. *International Journal of Pavement Engineering*, 1, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1408270>

- Sutuli, F. J., Dorneles, R., Vargas, C. O., & Kettenhuber, P. L. W. (2018). AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO VEGETATIVA DE ESPÉCIES UTILIZADAS NA ESTABILIZAÇÃO DE OBRAS DE TERRA COM TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL. *Ciência Florestal*, 28(1), 1-12. <https://doi.org/10.5902/1980509831567>
- Thenoux, G., & Carrillo, H. (2002). *Estudio para la utilización de cenizas provenientes de la caldera cogeneradora petropower en la estabilización de suelos*. 1-16. http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/15ThenouxCenizasPetropower.pdf
- Thompson, R. (2014). *GUÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS ADECUADAS PRÁCTICAS EMPRESARIALES EN GESTIÓN AMBIENTAL RELACIONADA CON LAS OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN COLOMBIA: SISTEMA SOSTENIBLE PARA OBRAS VIALES* [Maestría en Gestión Ambiental, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/17955/ThompsonPerdomoRandy2014.pdf?sequence=1>
- Ulloa López, H. (2015). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas* [Trabajo monografico para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. <http://repositorio.unan.edu.ni/6456/>
- Vigiak, O., Grizzetti, B., Udias-Moinelo, A., Zanni, M., Dorati, C., Bouraoui, F., & Pistocchi, A. (2019). Predicting biochemical oxygen demand in European freshwater bodies. *Science of The Total Environment*, 666, 1089-1105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.252>
- Watson, J. G., & Judith, C. C. (2000). *Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates*: 240. <https://doi.org/DRI Document No. 6110.4F>