

Implementación de barreras de viento vegetal con diferentes especies de árboles en torno a edificaciones

Implementation of vegetative wind barriers with different tree species around buildings

DOI: 10.46932/sfjdv6n2-006

Received on: Jan 10th, 2025

Accepted on: Jan 31st, 2025

Bryam Tejedor Macias

Arquitecto

Institución: Universidad Católica de Cuenca

Dirección: Cuenca, Ecuador

Correo electrónico: bstejedorm33@est.ucacue.edu.ec

Marco Avila-Calle

Arquitecto

Institución: Universidad Católica de Cuenca

Dirección: Cuenca, Ecuador

Correo electrónico: mavila@ucacue.edu.ec

RESUMEN

Desde tiempos remotos, el ser humano ha empleado diversas estrategias pasivas en la arquitectura para mejorar las condiciones de confort ambiental. Entre estas estrategias destacan las barreras naturales, como la vegetación, que se utilizan comúnmente alrededor de edificaciones. Las diferentes especies de árboles presentes en una región pueden cumplir un propósito específico, como acondicionar el clima de las viviendas y protegerlas de las ráfagas de viento. La metodología empleada en este estudio se basa en la experimentación, utilizando una maqueta de vivienda y vegetación virtual, ubicada dentro de Cuenca, Ecuador para simular escenarios reales. En estas maquetas, se aplican ráfagas de viento artificiales, midiendo su velocidad antes y después de implementar las barreras naturales. Este enfoque experimental permite evaluar la eficacia de las barreras vegetales en función de la especie de follaje utilizada. Los resultados indican que las barreras vegetales presentan diversas eficacias en la minimización de la velocidad del viento, dependiendo de la especie de vegetación empleada. En conclusión, las barreras vegetales constituyen una estrategia pasiva que, si se implementa correctamente, puede proporcionar beneficios significativos a los hogares, como la reducción de la velocidad del viento en un 30% y la mejora del confort térmico, como se ha evidenciado en estudios realizados en diversas regiones. La experimentación demuestra que la selección adecuada de especies vegetales y su disposición estratégica pueden mejorar notablemente el confort térmico y la protección contra el viento en edificaciones. Este estudio resalta la importancia de considerar factores regionales y específicos del sitio al diseñar y aplicar barreras vegetales como parte de soluciones arquitectónicas sostenibles.

Palabras clave: Viento, Cortinas Forestales, Cortinas Rompevientos, Barrera, Árbol.

ABSTRACT

Since ancient times, humans have used various passive strategies in architecture to improve environmental comfort conditions. Among these strategies, natural barriers such as vegetation stand out, which are commonly used around buildings. The different species of trees present in a region can serve a specific purpose, such as conditioning the climate of homes and protecting them from wind gusts. The methodology used in this study is based on experimentation, using a virtual housing and vegetation model,

located within Cuenca, Ecuador, to simulate real scenarios. In these models, artificial wind gusts are applied, measuring their speed before and after implementing the natural barriers. This experimental approach allows the effectiveness of plant barriers to be evaluated based on the species of foliage used. The results indicate that plant barriers have various efficiencies in minimizing wind speed, depending on the species of vegetation used. In conclusion, green barriers constitute a passive strategy that, if implemented correctly, can provide significant benefits to homes, such as reducing wind speed by 30% and improving thermal comfort, as evidenced by studies conducted in various regions. Experimentation shows that the appropriate selection of plant species and their strategic arrangement can significantly improve thermal comfort and wind protection in buildings. This study highlights the importance of considering regional and site-specific factors when designing and implementing green barriers as part of sustainable architectural solutions.

Keywords: Wind, Forest Curtains, Windbreak Curtains, Barrier, Tree.

1 INTRODUCCIÓN

La arquitectura es una disciplina que no solo integra conocimientos y principios del arte, la ciencia y la tecnología, también se manifiesta en la práctica a través de proyectos que consideran la sostenibilidad, la funcionalidad y la estética. Por ejemplo, el uso de materiales locales y técnicas de construcción tradicionales puede mejorar la eficiencia energética de un edificio (Manzano et al., 2015). Además del diseño espacial, la arquitectura involucra consideraciones en relación a la estructura, los materiales de construcción, la distribución del espacio, la iluminación, la ventilación y otros sistemas relevantes que contribuyen a la habitabilidad y al confort de los edificios.

La finalidad de la arquitectura siempre ha sido resguardar al ser humano de su entorno exterior. La función primordial de las edificaciones radica en ajustarse al clima predominante y proveer un entorno tanto interno como externo agradable y propicio para sus habitantes. Es importante enfocar la arquitectura al clima debido a que estudios a nivel mundial revelan que las personas experimentan mayor comodidad en lugares que cuentan con un ambiente atmosférico limpio y que se encuentran dentro de un rango específico de temperatura y humedad (Adiguzel et al., 2020).

La arquitectura bioclimática implica considerar las características climáticas y ambientales con el fin de lograr un ambiente térmicamente confortable en los espacios habitables, promoviendo la vida y el bienestar del ser humano. Este enfoque busca mantener un equilibrio armonioso entre el entorno natural y el hábitat construido (Guzmán, 2016).

El concepto de arquitectura bioclimática se fundamenta en la optimización de las características climáticas y la disposición de los edificios, con el objetivo de cumplir con las demandas de confort térmico en el interior, minimizando al máximo el consumo energético (Hany & Alaa, 2022).

En función a lo expuesto, se puede referir que la arquitectura bioclimática es una disciplina que persigue la concepción y planificación de espacios habitables mediante la consideración meticulosa de las condiciones climáticas y ambientales particulares de cada ubicación. Su objetivo primordial consiste en la optimización de los recursos naturales disponibles, tales como la radiación solar, la velocidad del viento y la cobertura vegetal, con el propósito de establecer un entorno interior confortable y sustentable (Adiguzel et al., 2020). Al incorporar variables climáticas, topográficas y otros elementos del entorno, esta busca alcanzar una máxima eficiencia energética, una minimización del impacto ambiental y una promoción del bienestar de los ocupantes. En esencia, esta disciplina arquitectónica persigue la búsqueda de una armonía holística entre el ser humano, la naturaleza y el entorno construido (Hany & Alaa, 2022).

Al hablar de arquitectura bioclimática es imprescindible tener en cuenta el confort, que hace referencia al bienestar y la satisfacción de los habitantes de una vivienda, siendo un estado de percepción ambiental que se encuentra influenciado por la salud del usuario (Guzmán, 2016). Este estado de bienestar está determinado por diversos factores, los cuales pueden clasificarse en dos categorías: endógenos, que corresponden a aquellos internos al individuo, y exógenos, que son factores externos que no dependen del individuo (Guzmán, 2016). Existen varios tipos de confort que pueden ser considerados en diferentes contextos y disciplinas (Daemei et al., 2019). El confort se relaciona con conceptos de bienestar y de salud, dentro del medio ambiente en el que una persona desarrolla sus actividades sin inconveniente y en perfectas condiciones climáticas y psicológicas (Piña, 2019). Por lo que se asume como un estado idóneo de desarrollo para la persona sin tener perturbación alguna. El confort térmico se refiere a un estado mental que indica la satisfacción con el ambiente térmico. Debido a las notables variaciones tanto fisiológicas y psicológicas entre personas, resulta desafiante satisfacer las necesidades de todos en un espacio determinado. Las condiciones ambientales necesarias para alcanzar la comodidad no son uniformes para cada individuo (Daemei et al., 2019).

El confort se vincula con el viento, el cual desempeña un papel crucial en el confort térmico, que se refiere a la percepción de bienestar térmico de un individuo en relación con las condiciones térmicas ambientales (Dorcas Mobolade & Pourvahidi, 2020). Facilita la disipación de calor del cuerpo humano mediante convección, acelerando la evaporación del sudor y contribuyendo a la refrigeración corporal, lo cual es especialmente relevante en climas cálidos. La velocidad del viento influye en la sensación térmica percibida, intensificando la percepción de frío durante el invierno y proporcionando alivio del calor durante el verano. En ambientes interiores, un flujo de aire adecuado previene zonas de aire estancado y distribuye uniformemente el calor o el aire acondicionado. La evaporación del sudor, crucial para la regulación térmica, es facilitada por el viento, aunque su eficacia disminuye con alta humedad relativa (Adiguzel et al., 2020).

En el diseño de edificios, la orientación y disposición de las estructuras pueden aprovechar el viento para mejorar el confort térmico, mientras que, en entornos urbanos, el viento interactúa con la arquitectura y la vegetación creando microclimas. En resumen, el viento influye en la percepción de frío y calor y en la eficiencia de los mecanismos de regulación térmica del cuerpo humano, y su gestión adecuada puede mejorar significativamente la comodidad térmica en diferentes entornos y condiciones climáticas.

En la actualidad, el cambio climático ha dejado una profunda huella en nuestro planeta y afecta en todos los aspectos al confort en los seres humanos y a las estructuras, por lo que se ha convertido en el mayor desafío medioambiental, al que el humano se enfrenta en el presente.

Los cambios en el clima se están produciendo de forma cada vez más acelerada y tienen la capacidad de impactar en el rendimiento anticipado de los edificios, no solo a largo plazo, sino también a lo largo de su vida útil. Esto demanda nuevos enfoques de diseño que consideren al clima como una variable temporal que afecta la adaptabilidad y la capacidad de recuperación de las edificaciones (Chiesa & Hardenberg, 2020).

Las liberaciones de gases que actúan en el efecto invernadero asociado a la industrialización mundial creciente, que mantiene una población que se ha multiplicado por seis en tan solo doscientos años, ha generado gran incidencia sobre el calentamiento global, mismo que va a un ritmo insostenible (Dorcas Mobolade & Pourvahidi, 2020). Para sostener a esta población en este ritmo ascendente, es necesario tener viviendas, las cuales, representan la mayor parte de las áreas urbanas; por lo que el diseño de viviendas bioclimáticas debe considerarse como un campo con atención prioritaria (Andrea et al., 2020).

Además, en la construcción, la falta de los criterios arquitectónicos y ambientales representan un gran problema en los sistemas construidos, los mismos que no permiten la disminución de los impactos ambientales (Zhunio, 2016). Evitando generar soluciones arquitectónicas que puedan estar vinculadas con el clima y el confort.

Este cambio climático impacta las corrientes de aire de manera substancial y multifacética. Primero, puede alterar los patrones de circulación atmosférica a escala global y regional, resultando en cambios en la intensidad, dirección y frecuencia de los vientos en distintas regiones, particularmente en áreas susceptibles a variaciones de temperatura. Además, el calentamiento global puede incrementar la frecuencia y severidad de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, ciclones y tormentas, lo cual lleva a la generación de vientos más veloces y ráfagas más intensas (Andrea et al., 2020).

2 MARCO TEÓRICO

Los vientos desempeñan un rol crucial en la circulación oceánica, afectando tanto el clima global como los ecosistemas marinos; variaciones en sus patrones pueden perturbar esta circulación. Además, las interacciones de los vientos con otros sistemas climáticos, como la distribución de nubes y la evaporación, pueden influir en el balance energético de la tierra y exacerbar el cambio climático. En resumen, estos efectos no solo alteran los patrones de viento, sino que también intensifican fenómenos meteorológicos extremos, con repercusiones significativas para el clima, los ecosistemas y las comunidades humanas a nivel global (Andrea et al., 2020).

En este contexto, conforme lo indicado en un estudio realizado por la Facultad de Artes Integradas de la Universidad de San Buenaventura (Medellín, Colombia) se estima que las edificaciones existentes o planificadas enfrentarán en el futuro, por ejemplo, entre 2050 y 2080, condiciones climáticas para las cuales no fueron originalmente diseñadas, ingresando en un proceso de obsolescencia térmica, dado que el aumento proyectado en la temperatura promedio, incluso en los escenarios más optimistas, implicará que los edificios experimentarán períodos más cálidos de lo previsto en su diseño inicial. Por lo tanto, se anticipa que será necesario implementar adaptaciones tanto pasivas como activas para asegurar su adecuado funcionamiento, lo cual podría resultar en un incremento del consumo energético. (Arango Díaz et al., 2022).

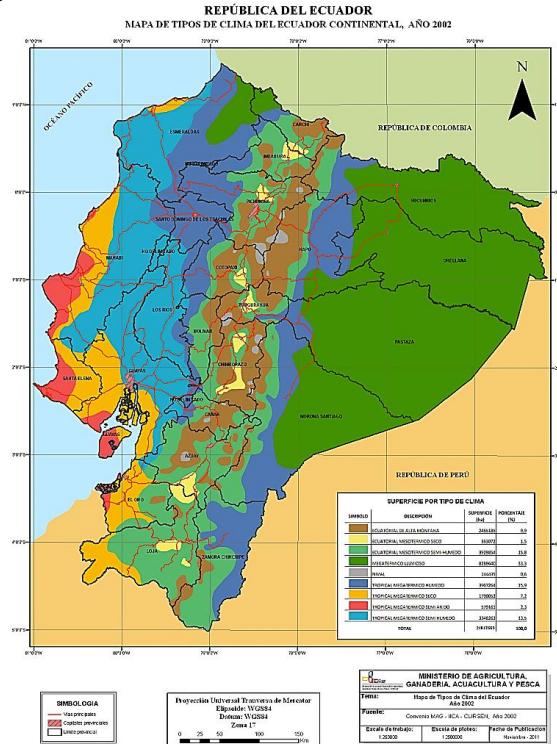
De acuerdo con el estudio de “Percepción de confort térmico en conjuntos residenciales y su incidencia en la calidad de vida” en Ecuador, el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda en 2018, conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), obtiene evidencia de la existencia de diversas edificaciones habitacionales que han descuidado la consideración de los factores climáticos durante el proceso de diseño y construcción de viviendas debido al incumplimiento de las mismas normas. Estos proyectos se enfocan en lograr una rápida edificación, buscando minimizar los costos en materiales, sin tomar en cuenta aspectos como la orientación y el aprovechamiento de los flujos de aire. En algunos casos, tampoco se reflexiona acerca del porcentaje establecido por las ordenanzas municipales que rigen las ciudades. (Toala et al., 2021)

Se tiene conocimiento de que dentro de estos proyectos habitacionales no se adoptan las medidas necesarias para proporcionar un confort térmico óptimo a los residentes. Además, existen otros factores importantes a considerar en el diseño y la construcción, como el entorno natural y la ubicación geográfica, teniendo en cuenta la proximidad de ríos o la presencia de una vegetación escasa o abundante.

Para tomar las características de estudio en Ecuador, ubicado en América del Sur, en el que incide significativamente la cordillera de los Andes y la presencia de la línea ecuatorial, goza de una posición geográfica especial que contribuye a la existencia de una variedad de pisos climáticos, los que se presentan

en la Figura 1. Para el presente estudio se tomará uno de los nueve pisos climáticos en Ecuador, conforme a la clasificación climática de Porrou (INAMHI,2016).

Figura 1. Pisos Climáticos en Ecuador de acuerdo a Porrou



Fuente: INAHMI (2016).

El estudio se realiza en la ciudad de Cuenca, al sur del país, cuyo clima es ecuatorial mesotérmico semihúmedo, que tiene una altitud de aproximadamente 2560 metros sobre el nivel del mar. Este clima se caracteriza por tener temperaturas variables entre 18° y 22° C, alcanzando sus valores más altos en los meses de marzo y septiembre, mientras que los meses de junio y julio registran los promedios más bajos.

Para el estudio es de suma importancia conocer información de los vientos y sus velocidades que se muestran a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1. Tabla informática de vientos en Cuenca

VIENTOS EN CUENCA ECUADOR					
Meses	Dirección Dominante	Calmas %	Velocidad media km/h	Velocidad Máxima km/h	Máximo Diario
Enero	EpS	35.6	5.04	8.64	6.48
Febrero	ESE	45.4	5.4	8.28	6.48
Marzo	EpS	42.0	5.04	10.08	6.12
Abril	EpS	37.7	5.04	8.28	6.84
Mayo	EpS	32.9	5.02	10.08	7.92
Junio	E	30.3	6.48	10.08	11.88
Julio	E	24.3	6.12	9.36	12.96
Agosto	E	23.7	8.28	11.52	13.32
Septiembre	E	32.9	7.2	11.16	10.44
Octubre	EpS	24.5	7.2	11.16	7.56

VIENTOS EN CUENCA ECUADOR					
Meses	Dirección Dominante	Calmas %	Velocidad media km/h	Velocidad Máxima km/h	Máximo Diario
Noviembre	SEpS	38.2	5.4	14.4	7.2
Diciembre	SEpE	23.0	5.4	8.64	7.2
Anualmente	E	32.5	6.34	10.14	8.68

Fuente: NASA climate science (2024).

De acuerdo al análisis realizado por satélites, estaciones meteorológicas y modelos climáticos en MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis, el período con mayor incidencia de viento en el año tiene una duración de 3,9 meses, abarcando desde el 26 de mayo hasta el 23 de septiembre, con velocidades promedio del viento superiores a 8,1 kilómetros por hora. El mes más ventoso del año en Cuenca es agosto, con vientos de una velocidad promedio de 11,52 kilómetros por hora (NASA climate science, 2024).

Por otra parte, el periodo con menos viento tiene una duración de 8,1 meses, desde el 23 de septiembre hasta el 26 de mayo. El mes más calmado del año en Cuenca es mayo, con vientos a una velocidad promedio de 5,02 kilómetros por hora (NASA climate science, 2024).

La velocidad del aire es uno de los principales factores que influyen en el confort térmico y en la temperatura. Por lo tanto, para eliminar calor de un edificio, es necesario facilitar la circulación del viento, mientras que, para evitar la pérdida de calor, es crucial proteger el edificio de los vientos (Fernández Reynoso et al. 2017). La segunda estrategia sería la más adecuada para la ciudad de Cuenca debido a su clima.

El flujo de aire favorece el intercambio convectivo en relación con la superficialidad de la envolvente, así como intercambios provocados por la ventilación e infiltración. Al momento en que el viento incide en la fachada de un edificio, la presión del aire aumenta en esa superficie, en tanto que, en la fachada opuesta, que se encuentra protegida del flujo de aire, se genera una minimización de la presión. Este diferencial de presión ocasiona el flujo de viento de un lado del edificio al otro mediante grietas y aberturas. (Oberschelp,2020).

Para reducir las dispersiones, es crucial implementar medidas de protección contra los vientos invernales y utilizar sistemas de sellado hermético en puertas y ventanas. Los obstáculos modifican el flujo del viento, desviándolo hacia arriba y creando una zona relativamente resguardada en el nivel del suelo, cuyo tamaño está determinado conforme la altura y la configuración de la barrera (Fernández Reynoso et al. 2017). Debido a la importancia y a la similitud de la investigación actual, se toma como ejemplo una estructura vertical compacta, como un muro, expuesta a un viento perpendicular, que puede generar una zona resguardada con una reducción de la velocidad del viento de aproximadamente un 75%.

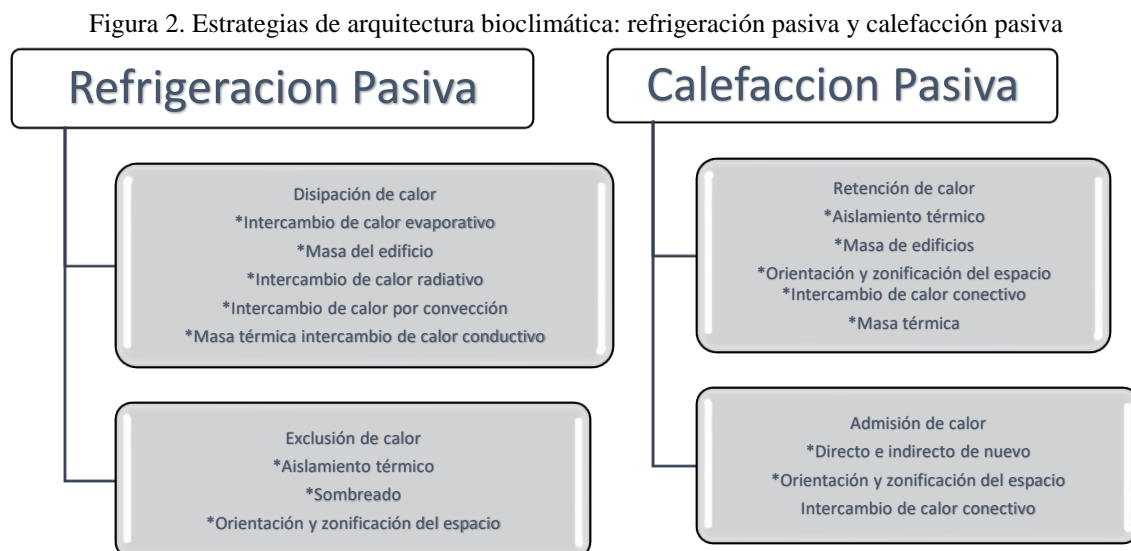
En contraste, una fila de árboles con denso follaje reducirá la velocidad del viento en menor medida, pero proporcionará una zona protegida más extensa (una reducción del 75% en el flujo del viento

se alcanza a una distancia igual a 25 veces la altura de la barrera vegetal arbórea). Para que un obstáculo arbóreo sea efectivo durante el invierno, debe ser constituida por especies de hoja perenne. En contraste, durante el verano, para optimizar el enfriamiento del edificio, es necesario remover cualquier elemento que impida el flujo de los vientos dominantes estacionales (Bustamante, 2021).

La disposición geométrica de las edificaciones altera el patrón de velocidades y presiones del viento, afectadas por sus dimensiones, configuración y separación, lo que puede resultar en efectos de protección recíproca o en la canalización y amplificación de la velocidad del viento. La dinámica interna del aire dentro de un edificio, depende de la geometría y tamaño de las aberturas. Aberturas de mayor tamaño en la zona de barlovento o zona en donde ingresa el viento, en comparación con la de sotavento o zona donde el viento va, incrementan la tasa de circulación del aire interior; al contrario, la disminución de esta configuración reduce la velocidad del aire. (Oberschelp,2020).

2.1 DESCRIPCIÓN DE ESTRATEGIA PASIVA

En un contexto bioclimático, las estrategias en función del clima de la ubicación escogida para el estudio, pueden involucrar el uso de calefacción pasiva, que consiste en retener y aprovechar el calor, así como refrigeración pasiva, que implica la exclusión y disipación del calor. En la Figura 2 se proporciona una visión general de las estrategias pasivas de calefacción y refrigeración. A continuación, se describen en detalle las estrategias pasivas. (Bugenings & Kamari, 2022).



Fuente: Bugenings & Kamari (2022).

Las estrategias pasivas se erigen como una valiosa herramienta para lograr la optimización de la eficiencia energética y el confort en la edificación, al mismo tiempo que fomentan la sostenibilidad y el

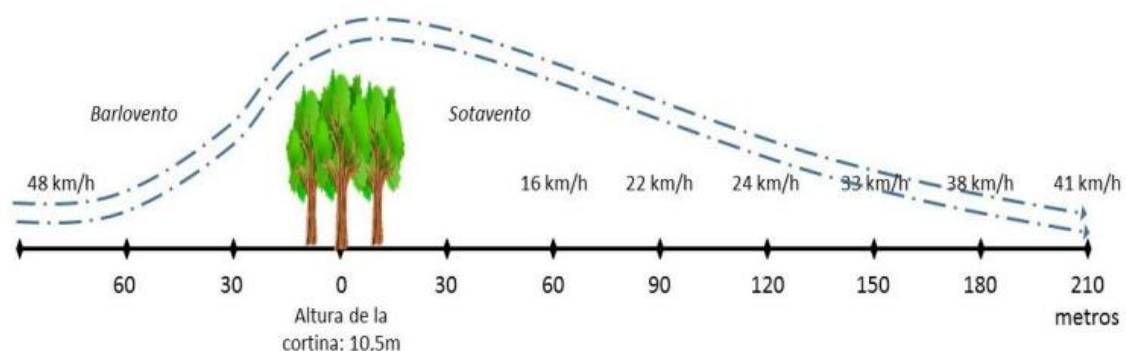
bienestar de los ocupantes. Su implementación adecuada puede contribuir a la configuración de entornos arquitectónicos que se caractericen por su responsabilidad y resiliencia, considerando el contexto del cambio climático y la imperante necesidad de reducir la huella ambiental asociada a la construcción.

En Cuenca debido a sus condiciones climáticas locales y la disposición, dirección y velocidad de vientos, se optará por la calefacción pasiva, a partir de la retención de calor mediante las barreras de viento para mitigar la pérdida de calor y el cambio del confort. Las barreras de viento naturales o vegetales son elementos identificados como recurso de uso adecuado para estrategias pasivas que crean una cortina de árboles acumulados, acondicionando el clima de las viviendas. Las cortinas forestales consisten en una o más filas de árboles que crean una barrera perpendicular a la dirección predominante del viento, reduciendo así su velocidad, el movimiento del suelo y la erosión

Las cortinas forestales consisten en la plantación de árboles y arbustos dispuestos en una o varias filas, con el propósito de modificar el flujo del viento y el microclima en un área específica, estas estructuras pueden diseñarse para actuar como una barrera. Para su eficacia, es crucial considerar tanto las características de las especies vegetales utilizadas como el grosor de la cortina (Oberschelp,2020).

Las cortinas forestales operan mediante dos mecanismos principales: en primer lugar, alterando los flujos de aire, las ondas sonoras y las emisiones de olores; en segundo lugar, actuando como filtros de contaminantes transportados por el aire, tales como sedimentos, nieve, nutrientes, pesticidas, patógenos y compuestos orgánicos volátiles. Cuando el viento impacta una cortina forestal, la presión del aire se incrementa en el lado de barlovento (el lado que recibe el viento) y una gran cantidad de aire se desplaza hacia arriba y sobre la cortina, o alrededor de sus extremos. Este proceso permite modificar el microclima de las áreas adyacentes a las cortinas, cuyos objetivos y efectos dependen de su diseño específico, como se puede observar en la Figura 3. Tanto las características de la especie vegetal utilizada como el grosor de la cortina son esenciales para su correcta funcionalidad (Copes, 2012).

Figura 3. Efecto de la cortina forestal contra el viento



Fuente: Fernández Reynoso et al. (2017).

Las barreras vegetales constituyen otro tipo de sistemas de fitoclimatización, es decir, son soluciones que combina tecnologías naturales, energéticamente eficientes, que responden a desafíos climáticos como temperatura, viento y que se utiliza se emplean en bío climatización. Estos sistemas, conocidos también como muros vegetales, consisten en formaciones lineales de especies de plantas diseñadas para reducir la velocidad del viento, conservar la humedad, marcar los límites de los terrenos, ofrecer sombra y embellecer el paisaje. Inicialmente, su función principal era proteger contra el viento; hoy en día, también se emplean como aislantes acústicos. En este estudio se explora la posibilidad de utilizar su capacidad para proporcionar sombra con el fin de emplearlos como sistemas de regulación térmica para edificios. (Rodríguez, 2017).

El diseño de las cortinas forestales depende de su ubicación y de sus condiciones del sitio, ubicándose de tal manera que se disminuya la intensidad del viento. Para maximizar su eficacia, es crucial identificar el sector a planificar y proteger la disposición y la longitud de la cortina (Huigeras,2009). Los aspectos a considerar incluyen:

Orientación: La cortina será más eficaz si se establece perpendicularmente a la dirección predominante del viento, dependiendo de la región. Si hay múltiples direcciones de viento, se recomienda diseñar cortinas formando una “L”, “T”, o alrededor de los predios (Oberschelp,2020).

Distanciamiento entre plantas e hileras: El número de hileras depende de los sectores a proteger, la velocidad del viento y la topografía. Generalmente, varía entre 1 y 4. El distanciamiento entre follajes en una fila cambia entre 1,5 y 2 m. y entre hileras, entre 2 y 3 m. dependiendo de la especie y la densidad deseada (Oberschelp,2020).

Densidad: específicamente dado por el distanciamiento y la especie. Si los follajes entre árboles están muy distanciados, el viento pasará sin resistencia significativa. Si están muy cercanos, el viento se desviará rápidamente, causando turbulencias. La densidad correcta se alcanza al plantar a la distancia adecuada y mediante podas y raleos (Oberschelp,2020).

Altura de los árboles: La altura es crucial, puesto que demuestra el área a proteger. La distancia máxima de protección oscila entre 15 y 20 veces la altura de los árboles. Por ejemplo, una pantalla de 10 metros de altura ofrecerá protección en un área de hasta 150-200 metros (Oberschelp,2020).

Todos estos criterios de diseño en barreras vegetales se emplean en función de la reducción de la velocidad del viento.

En Ecuador, el cedro (*Cedrela montana*) es una especie nativa en Cuenca que se encuentra en las regiones costeras y amazónicas, formando parte de la vegetación natural y siendo su madera altamente valorada. El cedro (ver Figura 4), se desarrolla en bosques montanos situados entre 1,000 y 3,000 metros sobre el nivel del mar, prefiriendo ambientes húmedos y suelos bien drenados, a menudo en pendientes pronunciadas y áreas con alta humedad y frecuente nubosidad. Puede alcanzar alturas de hasta 30 m. con

un diámetro de tronco que puede superar el metro. Sus hojas son compuestas, alternas y pinnadas, con folíolos lanceolados de margen entero. Las flores son pequeñas, de color blanco o crema, y se disponen en panículas terminales. El fruto es una cápsula leñosa que contiene semillas aladas, facilitando la dispersión por el viento (Minga et al,2016).

Figura 4. Cedro en Cuenca



Fuente: Elaboración propia (2024).

El álamo (*Populus balsamifera*.), introducido principalmente en áreas andinas, se utiliza para cortavientos y recuperación de suelos degradados. Se encuentran principalmente en la región andina de Ecuador, en Cuenca no es la excepción. Se trata de árboles introducidos, no necesariamente nativos de la región, pero se han adaptado donde el clima templado y la altitud son propicios para su crecimiento, ubicándose en zonas rurales, a lo largo de caminos y en áreas de cultivo. El álamo (ver Figura 5), prefiere suelos bien drenados, húmedos y ricos en nutrientes, similares a sus hábitats nativos en el hemisferio norte, y a menudo se plantan en áreas con buena disponibilidad de agua, como cerca de ríos y en zonas con sistemas de riego. En el país, los álamos pueden alcanzar alturas de 20 a 30 m. dependiendo de las condiciones locales, con troncos rectos y cilíndricos, y corteza que puede ser lisa o fisurada con la edad. Las hojas son

simples, alternas y varían en forma desde ovadas a lanceoladas, con bordes dentados, características que facilitan la identificación de las distintas especies presentes en el país (Minga et al, 2016).

Figura 5. Álamo en Cuenca



Fuente: Elaboración propia (2024).

El ciprés (*Cupressus macrocarpa*) también introducido en Cuenca, se cultiva en zonas de mayor altitud, especialmente en los Andes, donde se emplea en reforestación y como árbol ornamental. Se encuentran principalmente en la región andina de Ecuador, donde el clima templado y la altitud favorecen su crecimiento, aunque también se pueden encontrar en parques, jardines y áreas de reforestación en diversas partes del país. Prefieren suelos bien drenados y pueden crecer en una variedad de tipos de suelo, incluidos los pobres en nutrientes, mostrando resistencia a la sequía y prosperando en áreas con baja disponibilidad de agua. En Ecuador, los cipreses (ver Figura 6), pueden alcanzar alturas de 10 a 25 metros, dependiendo de las condiciones locales, presentando una forma cónica o columnar, con ramas densas y una corteza generalmente marrón que puede volverse rugosa y fisurada con la edad. Las hojas son pequeñas, escamosas y de color verde oscuro, dispuestas de manera opuesta y estrechamente adheridas a las ramas, lo que confiere al árbol una apariencia densa y compacta (Minga et al, 2016).

Figura 6. Ciprés en Cuenca



Fuente: Elaboración propia (2024).

El pino (*Pinus radiata*), especie introducida en la ciudad de Cuenca, se cultiva en plantaciones forestales en la región andina, siendo utilizado para la producción de madera, papel y en proyectos de reforestación. Se distribuyen principalmente en las regiones montañosas de la Sierra ecuatoriana, donde el clima templado y la altitud son propicios para su crecimiento, aunque también pueden encontrarse en algunas zonas costeras y amazónicas, siempre que las condiciones climáticas lo permitan. Los pinos (ver Figura 7), prefieren suelos bien drenados y ligeramente ácidos, aunque pueden tolerar una variedad de tipos de suelo, y muestran resistencia a la sequía, pudiendo desarrollarse en áreas con precipitaciones variables. Morfológicamente, los pinos en Ecuador pueden alcanzar alturas notables, que varían entre los 20 y 50 metros, dependiendo de las condiciones locales, caracterizándose por tener troncos rectos y cilíndricos, con una corteza gruesa y escamosa. Sus hojas son aciculares, largas y delgadas, dispuestas en fascículos o grupos en las ramas, de color verde oscuro, y tienen la particularidad de permanecer en el árbol durante varios años antes de caer (Minga et al,2016).

Figura 7. Pino en Cuenca



Fuente: Elaboración propia (2024).

Estos árboles desempeñan un papel crucial en el medio ambiente de Ecuador, contribuyendo a la silvicultura sostenible, la recuperación de suelos y la biodiversidad.

El presente estudio propone utilizar, como barrera verde los 4 diferentes tipos de especies vegetales mencionados anteriormente en el contexto ecuatoriano actual con el fin de observar la reducción de las velocidades del viento que se obtiene conforme a las características de cada uno de ellos, y la mejoría que se produce en la bío climatización de edificaciones.

3 METODOLOGÍA

Acorde a que los fines de esta investigación se centran en el confort térmico a partir de la incidencia de barreras vegetales, se ha optado por considerar diversas fuentes sobre el diseño bioclimático de viviendas con la utilización de estrategias pasivas.

Se realiza en este caso una investigación cuantitativa experimental en el tema de la arquitectura bioclimática, basada en las condiciones climáticas de la ciudad de Cuenca, y de especies vegetales nativas y nativas introducidas, en el que se muestra como las barreras vegetales en la ciudad de Cuenca, interactúan en una disminución del viento y en el confort térmico.

Experimentación del Muro Vegetal

Para realizar la experimentación del muro vegetal, se emplearon varias herramientas como software para simulaciones de viento y diseño 3D en estructuras arquitectónicas, detallado a continuación:

SolidWorks versión 2024 es un software de diseño asistido por computadora (CAD) que se emplea principalmente en la creación de modelos 3D y en la simulación de productos (ver Figura 8). Aunque no está particularmente destinado al análisis de viento, SolidWorks incluye un módulo denominado SolidWorks Flow Simulation, que permite realizar simulaciones de dinámica de fluidos, abarcando el estudio del flujo de viento.

Figura 8. SolidWorks Flow Simulation 2024



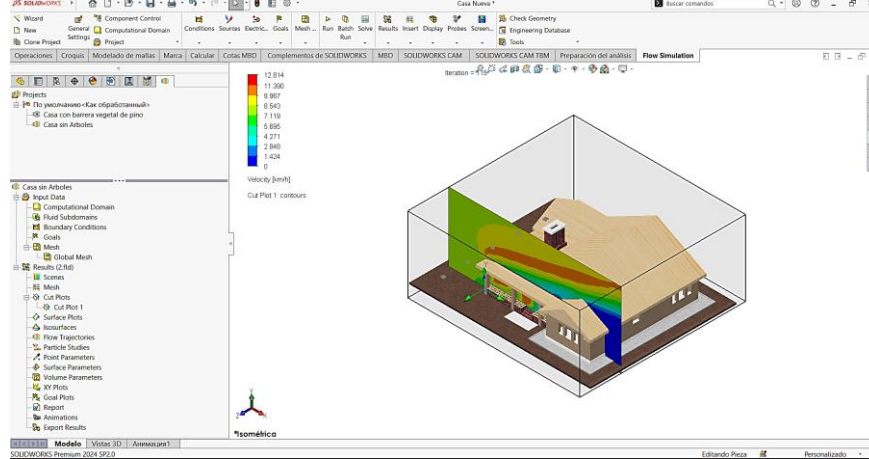
Fuente: Elaboración propia en base a Solid Works (2024).

3.1 SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

SolidWorks Flow Simulation es un software avanzado de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) desarrollado por SolidWorks Corporation. Este software se emplea extensamente para analizar y predecir el comportamiento de fluidos (líquidos y gases) y la transferencia de calor en entornos virtuales. Sus aplicaciones principales incluyen el diseño y validación de productos que interactúan con fluidos, como sistemas HVAC, bombas y sistemas de refrigeración, permitiendo optimizar el flujo, mejorar la eficiencia energética y minimizar las pérdidas. Además, facilita análisis detallados de la transferencia de calor y la distribución de temperaturas, fundamentales para diseñar sistemas de calefacción, refrigeración y disipadores de calor. SolidWorks Flow Simulation también permite simular fenómenos complejos como la convección natural y el flujo turbulento, ayudando a los ingenieros a verificar diseños antes de la fabricación física, lo que optimiza costos y tiempos de desarrollo (Solid Works, 2024).

Con este software se realizará la simulación de vientos con velocidades obtenidas anteriormente en la ciudad de Cuenca, con las distintas barreras vegetales para observar su disminución de velocidad. Como ejemplo, véase la Figura 9.

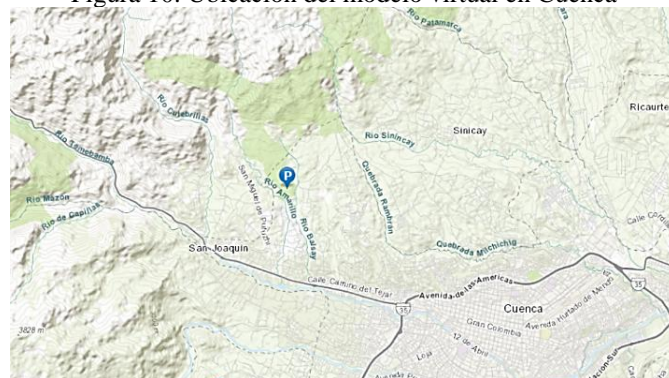
Figura 9. Software SolidWorks Flow Simulation simulando vientos en modelo virtual.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Para el siguiente paso, se modeló un prototipo virtual con una topografía a nivel que incluye una edificación de dos plantas. La edificación se la implantó en una ubicación cercana a la ciudad de Cuenca, la misma ubicación en la que se obtuvieron los datos de vientos por parte de los satélites de medición para la obtención de datos respectivos y poder realizar el experimento con una mayor precisión geográfica la cual se observa continuación en la Figura 10:

Figura 10. Ubicación del modelo virtual en Cuenca



Fuente: Elaboración propia (2024).

Esta edificación recibe el viento en una dirección real, en este caso en el software de SolidWorks direcciona el viento desde el Este, la zona donde predominan los vientos en Cuenca. Solo con fines visuales, para una mejor presentación, se realizó un modelo virtual en el programa Lumion 12 en el que se puede observar de una mejor manera la Figura 11:

Figura 11. Maqueta virtual para experimento



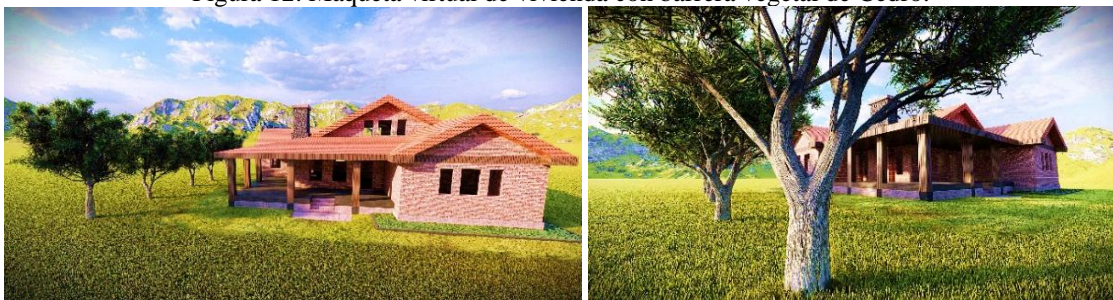
Fuente: Elaboración propia (2024).

Se emplearon cuatro tipos de follajes mencionados anteriormente para representar una variedad de árboles presentes en la región los cuales se colocan de manera de una hilera recta con el fin de generar un muro vegetal; adicionando su descripción de características influyentes en el estudio como el caso de distancias con respecto a la vivienda, altura y distancia de follaje, distancia entre cada árbol, y son los siguientes:

3.2 ÁRBOL DE CEDRO:

Para esta barrera vegetal se adoptan 5 árboles de pino, con una altura de 7 metros de alto por cada uno, y un diámetro de 1.40 metros de volumen en su follaje, la separación de cada árbol a 1,50 metros de distancia entre sus troncos (ver Figura 12).

Figura 12. Maqueta virtual de vivienda con barrera vegetal de Cedro.



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.3 ÁRBOL DE ÁLAMO

En esta barrera vegetal se ocupan 5 árboles de Álamo, con una altura de 6 metros de alto, y un diámetro de 0.40 metros de volumen en su follaje, al igual en que en la barrera de cedro, la separación de cada árbol se encuentra a una distancia de 1.50 metros entre tronco y tronco (ver Figura 13).

Figura 13. Maqueta virtual de vivienda con barrera vegetal de Álamo.



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.4 ÁRBOL DE CIPRÉS

En la siguiente barrera se utilizan 7 árboles de ciprés, con una altura de 5 metros de alto, y un diámetro de 0.60 metros de volumen en su follaje, al igual que en anteriores barreras, cada árbol tiene una separación de 1.50 metros desde tronco a tronco (ver Figura 14).

Figura 14. Maqueta virtual de vivienda con barrera vegetal de Ciprés.



Fuente: Elaboración propia (2024).

3.5 ÁRBOL DE PINO

En la última barrera vegetal se aplica una barrera de 6 árboles de pino con una altura de 7 metros de alto, y un diámetro de 2.20 metros de volumen en su follaje, la separación de cada uno de tronco a tronco es de 2,30 metros de distancia. (ver Figura 15).

Figura 15. Maqueta virtual de vivienda con barrera vegetal de Pino.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Estas herramientas y configuraciones se utilizaron para evaluar la efectividad de diferentes tipos de follaje como barreras vegetales en la minimización de la velocidad del flujo de aire; y, en base a las pruebas realizadas con el software, se obtuvieron diversos valores de la velocidad del viento en kilómetros por hora (km/h). Los pasos realizados fueron los siguientes:

Se obtuvo gráficamente la información sobre la velocidad del viento. Se encontró que el nivel de impacto del viento se da a una velocidad de 10,14 km/h., siendo esta la velocidad máxima promedio anualmente en la ciudad de Cuenca, tomando esta información con base en la Tabla 1. de vientos informática de Cuenca realizada en el estudio. Este valor representa la velocidad máxima obtenida sin la presencia de ninguna barrera vegetal, es decir velocidad inicial como se puede observar en la Figura 16.

Figura 16. Gráfica de velocidad de viento sin barreras vegetales.

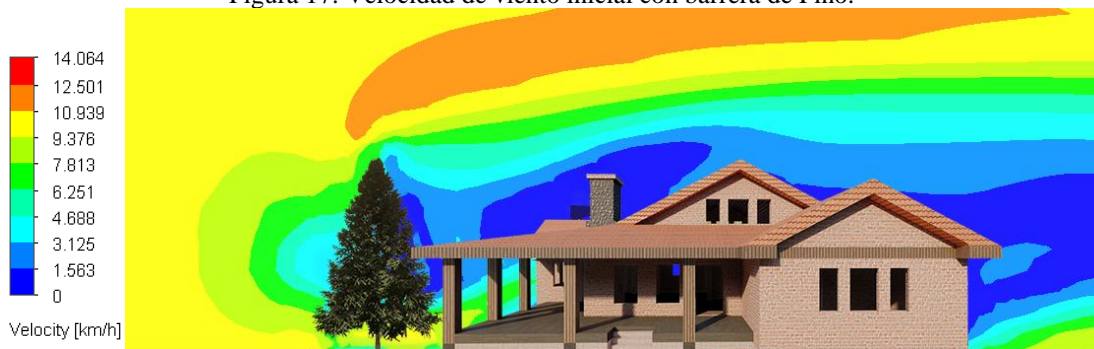


Fuente: Elaboración propia (2024).

A partir de la información obtenida, se continuó con la implementación barreras vegetales con diferentes especies de árboles, registrando el valor de la velocidad del viento obtenido para cada una de las barreras vegetales.

Para la primera barrera vegetal se utilizó una barrera de pino con las características mencionadas anteriormente, obteniendo los siguientes resultados gráficos en la Figura 17.

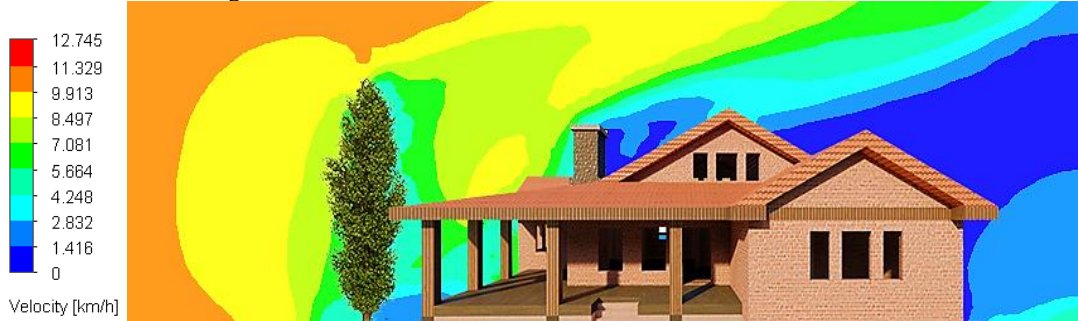
Figura 17. Velocidad de viento inicial con barrera de Pino.



Fuente: Elaboración propia (2024).

En la segunda barrera vegetal se utilizó una barrera de álamo también mencionada ya sus características anteriormente obteniendo los siguientes resultados gráficos en la Figura 18.

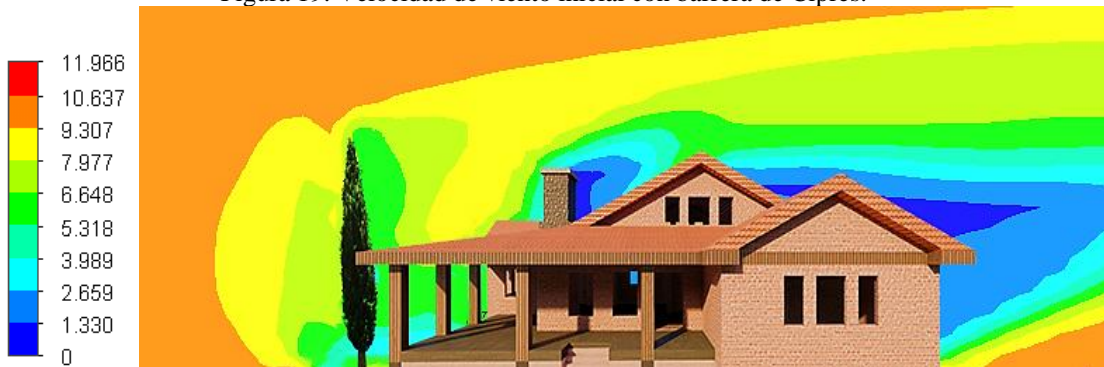
Figura 18. Velocidad de viento inicial con barrera de Álamo.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Para el tercer caso, se utilizó una barrera de ciprés con sus características respectivas mencionadas anteriormente obteniendo los siguientes resultados gráficos en la Figura 19.

Figura 19. Velocidad de viento inicial con barrera de Ciprés.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Finalmente, se consideró una barrera de cedro con características también mencionadas anteriormente obteniendo los siguientes resultados gráficos en la Figura 20.

Figura 20. Velocidad de viento inicial con barrera de Cedro.



Fuente: Elaboración propia (2024).

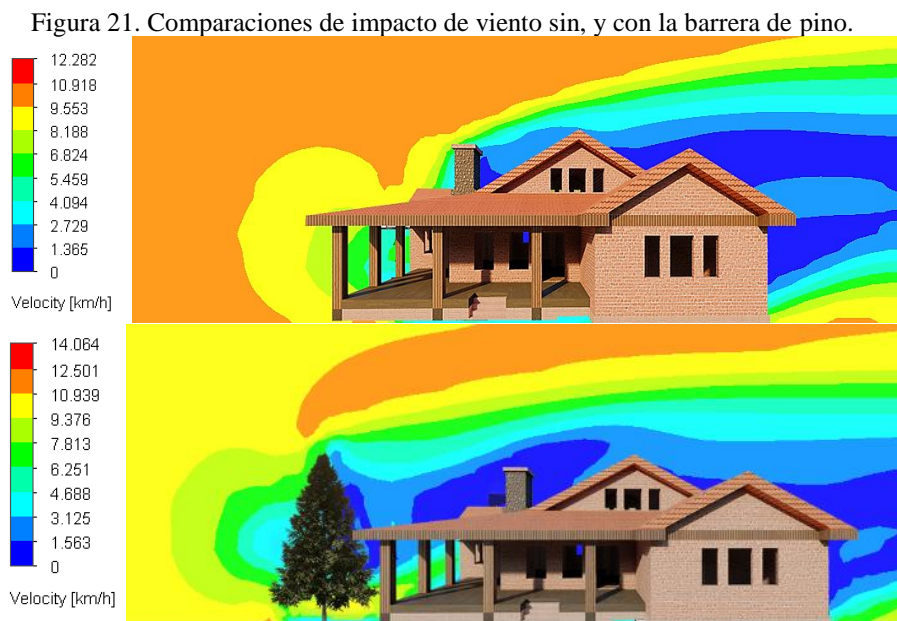
4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Durante la experimentación, se pudo determinar que las características específicas de cada especie, incluyendo su follaje, influían en la eficacia de la barrera vegetal para reducir la velocidad del viento en diferentes grados:

La velocidad del viento, impacta a una velocidad de 10,14 km/h. siendo esta la velocidad máxima promedio anualmente en la ciudad de Cuenca, este valor representa la velocidad máxima obtenida sin la presencia de ninguna barrera vegetal.

Se hace una comparación entre la vivienda sin, y con las barreras vegetales con distintos árboles por lo que da los siguientes resultados:

En el primer caso, con un total de impacto de 10,14 km/h. sin barrera de pino, que al implantarla disminuye el impacto de vientos en la fachada este de 1 a 2 km/h., es decir con una disminución de 8,14, a 9,14 km/h. Estos valores se encuentran gráficamente demostrados en la Figura 21.



Fuente: Elaboración propia (2024).

En el siguiente caso en el que se implanta la barrera vegetal de álamo, la velocidad de impacto disminuye de 4 a 5 km/h., es decir la disminución de viento llega a tener un total de 5,14 a 6,14 km/h. Los valores se demuestran a continuación en la Figura 22.

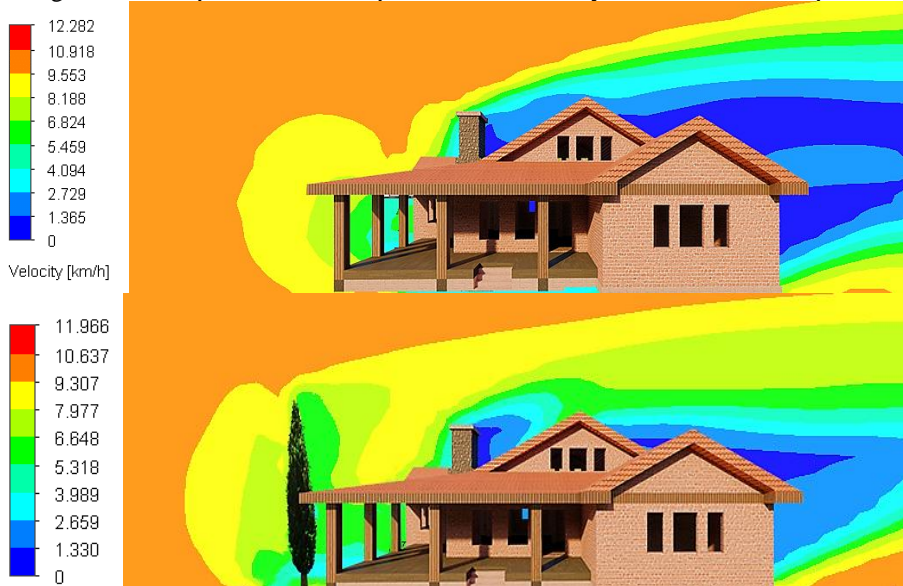
Figura 22. Comparaciones de impacto de viento sin, y con la barrera de álamo.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Para el tercer caso en el que la barrera de ciprés se implanta, llega a tener una velocidad de impacto de viento de 5 a 6 km/h. es decir con una disminución de 4,14 a 5,14 km/h. Los siguientes valores se encuentran demostrados en la Figura 23.

Figura 23. Comparaciones de impacto de viento sin, y con la barrera de ciprés.



Fuente: Elaboración propia (2024).

Y para el último caso de estudio se tiene la barrera de cedro que disminuye una gran cantidad el impacto con velocidades de 0 a 1 km/h., de viento en la vivienda. Estos valores se demuestran en la Figura 24.

Figura 24. Comparaciones de impacto de viento sin, y con la barrera de cedro.



Fuente: Elaboración propia (2024).

De todo este análisis se concluye que la barrera vegetal que contiene el árbol de Pino, mostró resultados significativamente distintos debido a su abundante follaje, el cual cubre toda la barrera. Aquí, la velocidad del viento se redujo de 8 a 9 km/h.

La barrera vegetal que contiene el árbol de cedro demostró una eficacia mayor como barrera, ya que disminuyó el paso de viento de 9 a 10 km/h., debido a la disposición cercana de sus ubicaciones y a su abundante follaje.

Posteriormente, la barrera vegetal que contiene el árbol de álamo también permitió una disminución de la velocidad de viento de 5 a 6 km/h. debido a la disposición de sus ramas y follaje, en gran parte cubre la parte superior del follaje, pero indistintamente la falta de follaje en su parte inferior del árbol, permite el paso del viento.

Debido a la utilización de un ciprés de poco follaje y a la separación de sus unidades vegetales, la velocidad del viento disminuye de 4 a 5 km/h, posicionándose como el árbol con menor protección de viento entre las distintas barreras vegetales.

Como resultado final se obtiene que la barrera que más protege es la barrera vegetal de cedro, seguida de la barrera vegetal de pino. La siguiente barrera en proteger es la de álamo y la barrera que menos protege en este caso es la barrera de ciprés. Estos resultados demuestran que el árbol con mayor acumulación de follaje proporciona una protección más efectiva para la vivienda.

Tabla 2. Tabla informativa de la disminución con vientos en Cuenca con distintas barras vegetales.

Barrera vegetal	Ráfaga de viento en barrera vegetal	Ráfaga de viento en vivienda	Disminución de viento
Pino	10,14 km/h.	1 a 2 km/h.	8,14, a 9,14 km/h.
Álamo		4 a 5 km/h.	5,14 a 6,14 km/h.
Ciprés		5 a 6 km/h.	4,14 a 5,14 km/h.
Cedro		0 a 1 km/h.	9,14 a 10,14 km/h.

Fuente: Elaboración propia (2024).

Hay que tomar muy en cuenta también las siguientes variables, como el caso de la densidad del follaje, la adaptabilidad, su mantenimiento, costo de implementación y costos de mantenimiento, que son de suma importancia para el estudio.

Las características de densidad de follaje y otras propiedades varían entre el pino, álamo, ciprés y cedro, y son factores importantes a considerar para el uso en jardinería, protección contra el viento o para la sombra.

El pino tiene una densidad de follaje que varía de moderada a densa, dependiendo de la especie. Su follaje es perenne, con hojas aciculares (en forma de aguja) que suelen agruparse en manojos y es menos denso cerca del tronco. El pino es ideal para áreas donde se desea sombra parcial y resistencia al viento, siendo una buena opción para zonas montañosas y suelos bien drenados.

El álamo tiene una densidad de follaje moderada a baja. Su follaje tiende a ser más disperso y permite la entrada de luz. Es un árbol de hojas caducas (pierde las hojas en invierno) con una textura amplia y suave en comparación con el pino y el ciprés, por lo que es ideal para crear sombra durante el verano y dejar entrar luz en invierno; se usa como barrera corta vientos debido a su altura, aunque su follaje no es tan denso.

El ciprés presenta una alta densidad de follaje, lo que le da una excelente capacidad como barrera visual y contra el viento. Tiene un follaje perenne con hojas pequeñas y escamosas y un crecimiento compacto, lo cual lo hace ideal para setos. Por estas características, es perfecto para cercos vivos y protección contra el viento.

El cedro tiene una densidad de follaje que varía de moderada a densa. Su follaje, aunque denso en la base, suele ser algo más abierto en las partes altas. Es perenne, con agujas planas y suaves que se disponen en ramas más amplias y dispersas. Se utiliza en paisajismo por su porte majestuoso y su resistencia, ya que proporciona buena sombra y puede actuar como cortaviento en áreas amplias.

Tabla 3. Tabla informativa de la densidad de follaje entre especies.

Especie	Densidad de follaje
Pino	Moderada a densa
Álamo	Moderada a baja
Ciprés	Alta
Cedro	Moderada a densa

Fuente: Elaboración propia (2024).

En la ciudad de Cuenca, Ecuador, el clima se caracteriza por ser templado y húmedo a lo largo del año, con estaciones de lluvias periódicas y temperaturas moderadas. Considerando estas condiciones climáticas:

El cedro suele mostrar buena adaptación a este clima, requiere un mantenimiento mínimo y pueden prosperar en suelos bien drenados y en zonas de precipitaciones regulares, lo que los convierte en una opción de plantación de larga duración.

El ciprés también se adapta favorablemente a este clima, aunque necesitan un espacio adecuado para su crecimiento óptimo, presentan baja demanda hídrica una vez establecidos y exhiben una alta resistencia a factores ambientales adversos.

Algunas especies de pino prefieren ambientes más fríos y secos. No obstante, ciertas especies de pino pueden crecer bien en condiciones templadas y húmedas, siempre y cuando se seleccione una variedad específica que tolere este tipo de clima, como el caso del propuesto en el estudio, además de requerir un mínimo de mantenimiento.

Si bien los álamos crecen rápidamente, presentan menor resistencia en climas constantemente húmedos, donde la humedad favorece el desarrollo de plagas y enfermedades. Además, su madera es más frágil y puede requerir un mantenimiento más intensivo en estas condiciones.

Tabla 4. Tabla de comparación de especies con respecto a adaptabilidad y mantenimiento en Cuenca.

Especie	Adaptabilidad	Frecuencia de mantenimiento
Pino	Moderada: algunas especies se adaptan mejor que otras	Moderado, requiere limpieza de agujas y poda ocasional
Álamo	Baja a moderada: menos adecuada para climas constantemente húmedos	Frecuente, por problemas de plagas y ramas quebradizas
Ciprés	Alta: tolera bien la humedad y el clima templado	Ocasional, poda ligera
Cedro	Alta: se adapta bien a climas templados y húmedos	Ocasional, principalmente poda mínima

Fuente: Elaboración propia (2024).

Los costos de plantación y mantenimiento de árboles varían significativamente según la especie y los cuidados que cada uno requiere.

El cedro presenta un costo de plantación medio a alto, dado que las plántulas de esta especie pueden ser costosas debido a su crecimiento más lento y su demanda como árbol ornamental y de madera de alta calidad. Sin embargo, su mantenimiento es bajo, ya que el cedro requiere poco riego y poda una vez establecido. Esto reduce los costos de mantenimiento a largo plazo, por lo que la inversión inicial, aunque moderada a alta, se ve compensada por los bajos costos de mantenimiento.

El ciprés también tiene un costo de plantación moderado. Esta especie es comúnmente utilizada en paisajismo y se puede adquirir a precios accesibles. El mantenimiento del ciprés es bajo, ya que, una vez establecido, requiere poco riego y solo podas esporádicas. Esto minimiza los gastos de mantenimiento

y convierte al ciprés en una opción de costos de plantación y mantenimiento moderados y sostenibles a largo plazo.

En el caso del pino, el costo de plantación varía considerablemente. Algunas especies de pino que se adaptan a climas templados pueden ser más caras que las especies más comunes, y el costo también depende de la disponibilidad local. En cuanto al mantenimiento, el pino tiene necesidades moderadas. Requiere limpieza de agujas caídas y, en algunos casos, poda ocasional, lo que incrementa los costos de mano de obra. Por lo tanto, aunque la inversión inicial puede variar, el mantenimiento es moderado y podría aumentar según la especie.

En el último caso de álamo, es generalmente de bajo a medio costo de plantación. Es una opción económica y fácil de encontrar, además de ser de rápido crecimiento. No obstante, su mantenimiento es alto debido a su rápida tasa de crecimiento y su tendencia a desarrollar problemas de salud en climas húmedos, lo cual genera costos adicionales de poda, control de plagas y mantenimiento. Así, aunque el costo inicial es bajo, los gastos de mantenimiento a largo plazo pueden incrementar considerablemente.

Tabla 5. Tabla de comparación de especies con respecto a costos de plantación y mantenimiento en Cuenca.

Especie	Costo de plantación	Costo de mantenimiento
Pino	Medio	Moderado
Álamo	Bajo a medio	Alto
Ciprés	Medio	Bajo
Cedro	Medio a alto	Bajo

Fuente: Elaboración propia (2024).

De todas las especies estudiadas se tiene el siguiente cuadro que demuestra cuál es el árbol más factible a implantar en la ciudad de Cuenca conforme a los parámetros estudiados.

Tabla 6. Tabla de comparación de especies con mayor efectividad en el caso de estudio.

Especie	Disminución de viento	Densidad de Follaje	Adaptabilidad	Frecuencia de Mantenimiento	Costo de plantación	Costo de Mantenimiento
Pino	8,14, a 9,14 km/h.	Moderada a densa	Moderada: algunas especies se adaptan mejor que otras	Moderado, requiere limpieza de agujas y poda ocasional	Medio	Moderado
Álamo	5,14 a 6,14 km/h.	Moderada a baja	Baja a moderada: menos adecuado para climas constantemente húmedos	Frecuente, por problemas de plagas y ramas quebradizas	Bajo a medio	Alto
Ciprés	4,14 a 5,14 km/h.	Alta	Alta: tolera bien la humedad y el clima templado	Ocasional, poda ligera	Medio	Bajo
Cedro	9,14 a 10,14 km/h.	Moderada a densa	Alta: se adapta bien a climas templados y húmedos	Ocasional, principalmente poda mínima	Medio a alto	Bajo

Fuente: Elaboración propia (2024).

5 CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la efectividad de las barreras vegetales en la reducción de la velocidad del viento varía significativamente según la especie de árbol utilizada. En este escenario, con velocidad inicial de viento de 10,14 km/h, se observó que las características específicas del follaje y la disposición de las ramas de cada especie influyen en la capacidad de atenuar la velocidad del viento.

Sin barreras, la velocidad del viento que impacta directamente en la vivienda fue de 10,14 km/h, la velocidad máxima promedio anual en Cuenca. Con barreras vegetales, la reducción de la velocidad del viento varió entre las especies de árboles. Las barreras de cedro y pino fueron las más efectivas, mientras que las de álamo y ciprés fueron menos eficaces.

La barrera de cedro mostró la mayor efectividad, reduciendo la velocidad del viento a 0-1 km/h, respectivamente. Esto se debe a que mantiene una densidad de follaje alta y abundante. La barrera de pino también demostró una alta eficacia, reduciendo la velocidad del viento a 1-2 km/h, respectivamente. Esta especie también se encuentra dentro de las especies con una densidad de follaje alta. Las barreras de álamo y ciprés fueron menos efectivas, especialmente la de ciprés, que presentó la mayor reducción de velocidad menos significativa (4-5 km/h y 5-6 km/h) debido a que el ciprés y álamo mantienen un follaje moderadamente a baja, pero son árboles que abarcan un área más reducida.

Estos resultados indican que la densidad y disposición del follaje son factores críticos en la efectividad de las barreras vegetales para la reducción del viento. La implementación de barreras vegetales, especialmente de cedro y pino, puede ser una estrategia efectiva para mitigar los efectos del viento en áreas urbanas y rurales, mejorando la protección de viviendas y otras estructuras.

En el clima de Cuenca, las especies de cedro y ciprés se presentan como opciones de bajo mantenimiento y mayor adaptabilidad, mientras que el pino puede ser viable si se elige una especie adecuada. Por el contrario, el álamo podría demandar mayores cuidados y ser menos resistente a largo plazo en este entorno.

En términos de inversión a largo plazo, el cedro y el ciprés resultan ser opciones más rentables gracias a sus bajos costos de mantenimiento. El pino puede ser viable, pero su inversión inicial es variable y su mantenimiento moderado. Por último, aunque el álamo es la opción más económica en cuanto a plantación, sus altos costos de mantenimiento a largo plazo pueden hacerlo menos rentable en comparación con las otras especies.

6 RECOMENDACIONES

El estudio se limita a un rango específico de velocidades del viento y a condiciones geográficas de Cuenca, por lo que los resultados pueden no ser directamente aplicables a otras regiones con diferentes condiciones climáticas.

Futuros estudios deberían explorar la efectividad de otras especies de árboles, así como la influencia de factores adicionales como la altura y el espesor de las barreras vegetales en diversas condiciones climáticas.

En términos generales, la aplicación adecuada de una barrera vegetal representa una estrategia altamente beneficiosa para la protección residencial, como se evidenció en la experimentación.

Estos hallazgos son cruciales para la planificación urbana y rural, sugiriendo que la selección de especies de árboles con abundante follaje y adecuada disposición puede mejorar significativamente la protección contra el viento. Se recomienda la implementación de barreras de cedro y pino en áreas vulnerables a fuertes vientos para maximizar la protección de las viviendas y otras infraestructuras.

Finalmente, futuras investigaciones deben centrarse en la evaluación de otras especies de árboles y en la comprensión de cómo las diferentes configuraciones de barreras vegetales pueden optimizar la reducción del viento en diversas condiciones climáticas y geográficas.

Hay que tomar muy en cuenta los aspectos como altura de la barrera vegetal, separación entre unidad arbolara, follaje entre la vegetación, distanciamiento entre barrera vegetal y vivienda entre otros aspectos que son cruciales para que la eficacia de las barreras vegetales cumpla con su objetivo principal que es la climatización y protección.

En este caso también se obtiene que si se desea experimentar una disminución de viento es necesario que se utilicen árboles de gran follaje los cuales impidan el paso, contrariamente si se desea aprovechar el viento, se debe evitar cualquier tipo de barrera vegetal, o en últimos casos si se desea mantener un viento adecuado, es necesario mantener una separación adecuada y realizándolo en el software que permita mostrar datos que demuestren efectividad en su funcionamiento y luego poder realizarlo como una solución viable.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo es parte del trabajo de investigación y titulación del Programa de Maestría en Construcción con Mención en Administración de la Construcción Sustentable de la Universidad Católica de Cuenca, por ello agradecemos a todos y cada uno de los instructores pertenecientes a los grupos de investigación; Ciudad, Ambiente y Tecnología(CAT), y Sistemas embebidos visión artificial en ciencias, Arquitectónicas, Agropecuarias, Ambientales y Automática (SEVA4CA), por los conocimientos e información brindados para la elaboración del trabajo.

REFERENCIAS

- Adiguzel, F., Cetin, M., Kaya, E., Simsek, M., Gungor, S., & Bozdogan Sert, E. (2020). Defining suitable areas for bioclimatic comfort for landscape planning and landscape management in Hatay, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3–4), 1493–1503. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03065-7>
- Arango Díaz, L., Herreño Tellez, E., & Murillo Galvis, M. (2022). Cambio Climático y Bienestar Humano. *MÓDULO ARQUITECTURA CUC*, 29, 135–152. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.29.1.2022.06>
- Bugenings, L. A., & Kamari, A. (2022). Bioclimatic Architecture Strategies in Denmark: A Review of Current and Future Directions. *Buildings*, 12(2), 224. <https://doi.org/10.3390/buildings12020224>
- Bustamante, A. S. (2021). Characterization of the wind and apparent temperature in the urban canyons of the historic center of Cuenca, Ecuador. *Conservar Patrimonio*, 36, 90–105. <https://doi.org/10.14568/cp2019034>
- Chiesa, G., & Hardenberg, J. Von. (2020). Including climate change time-dimensions in bioclimatic design. *Journal of Technology for Architecture and Environment*, 20, 204–212.
- Copes, W. J. (2012). Evaluación de barreras vegetales para mitigar la deriva de pulverizaciones. Universidad Nacional del Comahue. Tesis de Maestría. 94 p.
- Daemei, A. B., Eghbali, S. R., & Khotbehsara, E. M. (2019). Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering*, 25, 100758. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100758>
- Dorcas Mobolade, T., & Pourvahidi, P. (2020). Bioclimatic Approach for Climate Classification of Nigeria. *Sustainability*, 12(10), 4192. <https://doi.org/10.3390/su12104192>
- Fernández Reynoso, D. S.; Martines Menés, M. R.; López Martínez, R.; Mendoza Gonzalez, C. E. (2017). Cortinas Rompevientos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Dirección General de Producción Rural Sustentable en Zonas Prioritarias. 17p. Disponible: <https://www.slideshare.net/demetriofernandez313/cortinas-rompevientos-2da-ed>
- Guzmán, C. F. (2016). Recomendaciones bioclimáticas para el diseño arquitectónico de vivienda unifamiliar en el clima ecuatorial mesotérmico semi húmedo, ubicado en el cantón Girón, provincia del Azuay [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. Universidad Católica de Cuenca.
- Hany, N., & Alaa, H. (2022). Thermal comfort optimization through bioclimatic design in Mediterranean cities. *F1000Research*, 10, 1047. <https://doi.org/10.12688/f1000research.73017.2>
- Higueras, E. (2009). El reto de la ciudad habitable y sostenible. Pamplona: DAPP. https://www.coag.es/websantiago/pdf/ciudad_habitable_sostenible.pdf
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2012). Mapa de tipos de clima y meteorología. INAMHI.

- Manzano, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Minga, D. A., & Verdugo Navas, A. (2016). Árboles y arbustos de los ríos de Cuenca. Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8784>
- NASA Climate Science. (2024). Climate change. NASA. <https://science.nasa.gov/climate-change/>
- Oberschelp, G. P. J., Harrant, L., Mastrandrea, C. A., Salto, C. S., & Palenzona, M. F. (2020). Cortinas forestales: Rompevientos y amortiguadoras de deriva de agroquímicos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://inta.gob.ar>
- Piña, D. A. (2019). Recomendaciones bioclimáticas de diseño arquitectónico en vivienda unifamiliar clima megatérmico lluvioso, parroquia Huamboya, provincia Morona Santiago [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. Universidad Católica de Cuenca.
- Rodriguez, F. (2019). Refugios Climaticos Diseño para ciudades del clima mediterraneo [Tesis]. Escuela Tecnica Superior de Sevilla.
- Toala, L. A., Vanga-Arvelo, M. G., Muñoz-Molina, J. G., & Zambrano-Quiroz, F. N. (2021). Percepción del Confort Térmico en Conjuntos Residenciales y su Incidencia en la Calidad de Vida. *Revista Lasallista de Investigación*, 18(1), 34–47. <https://doi.org/10.22507/rli.v18n1a3>
- Zhunio, C. S. (2016). Recomendaciones bioclimáticas para el diseño arquitectónico de vivienda unifamiliar. Universidad Católica de Cuenca.