

# Viviendas campesinas adaptadas al cambio climático con bioingeniería

Rural housing adapted to climate change through bioengineering

Habitações rurais adaptadas às mudanças climáticas com bioengenharia

Maisons rurales adaptées au changement climatique grâce à la bio-ingénierie

Fuente: Autoría propia

Recibido: 01/09/2025  
Aprobado: 23/02/2026

## Cómo citar este artículo:

Muñoz, M., Pinzón, M. & Araujo, A. (2026). Viviendas campesinas adaptadas al cambio climático con bioingeniería. Bitácora Urbano Territorial, 36(1): 73-87.  
<https://doi.org/10.15446/bitacora.v36n1.122566>

## Autoras

**Maria de los Angeles Muñoz Fernandez**

Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Palmira.  
Semillero de investigación ambiental (SIAMB)  
mamunozf@unal.edu.com  
<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0004-8696-6013>

**Maria Victoria Pinzon Botero**

Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Palmira.  
Semillero de investigación ambiental (SIAMB)  
vpinzonb@unal.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0002-4901-5540>

**Andrea Viviana Araujo Badiel**

Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Palmira.  
Semillero de investigación ambiental (SIAMB)  
aaraujob@unal.edu.co  
<https://orcid.org/0009-0003-2160-1198>

[1] Investigación financiada en el marco de dos proyectos de investigación universitaria.

## Resumen

---

Las construcciones destinadas al hábitat humano enfrentan desafíos significativos ante la adaptación al cambio climático (ACC), y la vivienda rural campesina (VRC) de alta montaña no es la excepción. Esta investigación identifica las características principales de la VRC y evalúa su potencial de adaptación mediante alternativas de bioingeniería. El estudio analizó 87 viviendas ubicadas en la cuenca alta del río Amaime, en el Valle del Cauca, Colombia, considerando tres variables principales y 18 indicadores territoriales, ambientales y constructivos, evaluados mediante encuestas y recorridos de campo. A partir de estos indicadores se calculó el Índice de Potencial de Adaptación (IPA) frente al cambio climático (CC). Características como el relieve del terreno, la distancia al río, la pendiente y el material predominante de la cubierta resultaron relevantes en la configuración del potencial adaptativo. Con base en el IPA y su relación con las condiciones específicas de cada vivienda, se estimó el Potencial de Incorporación de las Alternativas de Bioingeniería (PIAB) evaluadas (agua lluvia, las huertas verticales, el compostaje y los humedales artificiales), lo que permitió identificar las estrategias más adecuadas para cada caso.

**Palabras clave:** vivienda campesina, cambio climático, bioingeniería, adaptación, alta montaña

## Autoras

---

### Maria de los Angeles Muñoz Fernandez

Ingeniera Ambiental egresada de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, con más de 3 años de experiencia en investigación ambiental. Integrante del semillero de investigación ambiental (SIAMB). Su trabajo de grado se enfocó en estrategias de adaptación al cambio climático en vivienda campesina de alta montaña, integrando enfoques de arquitectura sostenible y bioingeniería.

### Maria Victoria Pinzon Botero

Docente de la Universidad Nacional de Colombia desde 1997. Doctora en Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo por la Universidad Politécnica de Catalunya. Magíster en Estudios Urbano-Regionales y Arquitecta por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Cuenta con amplia experiencia en docencia e investigación en ordenamiento territorial, urbanismo, sostenibilidad ambiental urbana, gestión ambiental e instrumentos de planificación.

### Andrea Viviana Araujo Badiel

Ingeniera Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Magíster en Ingeniería Ambiental, Auditora para Sistemas Integrados de Gestión HSEQ, Docente catedrático de la facultad de Ingeniería y administración, Profesional de apoyo de la Oficina de Gestión Ambiental encargada de los programas de Gestión Integral de la Energía, Gestión Integral del Agua y Educación Ambiental, miembro del Grupo de investigación en eficiencia energética y energías alternativas GEAL y miembro del semillero de Investigación Ambiental SIAMB.

## Abstract

Human habitat constructions face significant challenges in adapting to climate change (ACC), and high-mountain peasant rural housing (PRH) is no exception. This research identifies the main characteristics of PRH and evaluates its adaptation potential through bioengineering alternatives. The study analyzed 87 dwellings located in the upper basin of the Amaime River, in Valle del Cauca, Colombia, considering three main variables and 18 territorial, environmental, and construction indicators, assessed through surveys and field visits. Based on these indicators, the Climate Change Adaptation Potential Index (API) was calculated. Characteristics such as terrain relief, distance to the river, slope, and predominant roofing material were found to be relevant in shaping adaptive potential. Based on the API and its relationship with the specific conditions of each dwelling, the Incorporation Potential of the evaluated Bioengineering Alternatives (PIAB) (rainwater harvesting, vertical gardens, composting, and constructed wetlands) was estimated, allowing the identification of the most suitable strategies for each case.

**Keywords:** peasant housing, climate change, bioengineering, adaptation, high mountain

## Résumé

Les constructions destinées à l'habitat humain sont confrontées à des défis importants face à l'adaptation au changement climatique (ACC), et l'habitat rural paysan (VRC) de haute montagne ne fait pas exception. Cette recherche identifie les principales caractéristiques de l'VRC et évalue son potentiel d'adaptation à travers des alternatives de bio-ingénierie. L'étude a analysé 87 habitations situées dans le bassin supérieur du fleuve Amaime, dans le Valle del Cauca, en Colombie, en considérant trois variables principales et 18 indicateurs territoriaux, environnementaux et constructifs, évalués au moyen d'enquêtes et de visites de terrain. À partir de ces indicateurs, l'Indice de Potentiel d'Adaptation (IPA) au changement climatique a été élaboré. Des caractéristiques telles que le relief du terrain, la distance au fleuve, la pente et le matériau prédominant de la toiture se sont révélées déterminantes dans la configuration du potentiel adaptatif. Sur la base de l'IPA et de sa relation avec les conditions spécifiques de chaque habitation, le Potentiel de Mise en Œuvre des Alternatives de Bio-ingénierie (PIAB) évaluées (récupération des eaux de pluie, jardins verticaux, compostage et zones humides artificielles) a été estimé, permettant d'identifier les stratégies les plus adaptées à chaque cas.

## Resumo

As construções destinadas ao habitat humano enfrentam desafios significativos diante da adaptação às mudanças climáticas (ACC), e a habitação rural camponesa (VRC) de alta montanha não é exceção. Esta pesquisa identifica as principais características da VRC e avalia seu potencial de adaptação por meio de alternativas de bioengenharia. O estudo analisou 87 moradias localizadas na bacia alta do rio Amaime, no Valle del Cauca, Colômbia, considerando três variáveis principais e 18 indicadores territoriais, ambientais e construtivos, avaliados por meio de questionários e visitas de campo. A partir desses indicadores, foi construído o Índice de Potencial de Adaptação (IPA) às mudanças climáticas. Características como o relevo do terreno, a distância ao rio, a declividade e o material predominante da cobertura mostraram-se relevantes na configuração do potencial adaptativo. Com base no IPA e em sua relação com as condições específicas de cada moradia, foi estimado o Potencial de Implementação de Alternativas de Bioengenharia (PIAB) avaliadas (captação de água da chuva, hortas verticais, compostagem e wetlands construídos), permitindo identificar as estratégias mais adequadas para cada caso.

**Palavras-chave:** habitação camponesa, mudanças climáticas, bioengenharia, adaptação, alta montanha



**Viviendas campesinas adaptadas al cambio climático con bioingeniería**

**Mots-clés :** habitat paysan, changement climatique, bio-ingénierie, adaptation, haute montagne

## Introducción

La vivienda rural campesina (VRC) es una unidad socioespacial clave en América Latina, como espacio habitacional y como base de la producción económica, cultural y ecológica. En contextos andinos de alta montaña, articula producción agropecuaria, manejo del agua, almacenamiento y prácticas comunitarias, configurando sistemas donde lo doméstico y lo productivo se integran (Moreno et al., 2020). Sin embargo, estos sistemas enfrentan presiones crecientes asociadas al cambio climático (CC), la transformación del uso del suelo y la precariedad estructural histórica.

En Colombia, las viviendas enfrentan diversos retos derivados del déficit habitacional que según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE), afecta a 5,1 millones de hogares, de los cuales el 46.3% se encuentran en áreas rurales. La adaptación al cambio climático (ACC) en áreas rurales no puede limitarse a mejoras constructivas aisladas, requiere comprender la vivienda como parte de un entramado territorial que conecta ecosistemas estratégicos, dinámicas productivas y redes urbano-rurales.

Bajo este panorama, la vulnerabilidad climática se superpone con limitaciones estructurales asociadas al acceso a servicios, materiales y planificación territorial. En regiones de alta montaña andina, los cambios en los patrones de precipitación, la intensificación de eventos extremos y los procesos de erosión incrementan el riesgo de deslizamientos, pérdida de suelos y afectación de infraestructuras domésticas y productivas (IPCC, 2022), situaciones que se convierten en grandes desafíos, especialmente cuando se trata de población en condiciones socioeconómicas precarias.

Estos desafíos requieren de respuestas que integren la VRC a las alternativas ACC, lo que conduce a la pregunta central de esta investigación: ¿Cuál es el potencial de las viviendas campesinas de alta montaña en los Andes del Valle del Cauca, Colombia, para adaptarse al cambio climático mediante alternativas de bioingeniería?

Es necesario considerar que el CC, impulsado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero, está generando alteraciones significativas en el entorno global, afectando áreas urbanas y rurales. Según el Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Colombia ha experimentado aumento de temperatura y disminución de las precipitaciones, afectando la disponibilidad de recursos hídricos, vitales para la producción agrícola (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2025).

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC, 2021) establece estrategias para reducir la vulnerabilidad del País frente a los impactos del CC, enfocándose en fortalecer la resiliencia de los ecosistemas y mejorando las infraestructuras rurales.

En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza y las estrategias de bioingeniería emergen como enfoques relevantes para fortalecer la resiliencia territorial. A diferencia de intervenciones convencionales de infraestructura gris, estas alternativas promueven la integración entre procesos ecológicos y sistemas habitacionales, favoreciendo la gestión

*Las soluciones basadas en la naturaleza y las estrategias de bioingeniería emergen como enfoques relevantes para fortalecer la resiliencia territorial. A diferencia de intervenciones convencionales de infraestructura gris, estas alternativas promueven la integración entre procesos ecológicos y sistemas habitacionales, favoreciendo la gestión sostenible del agua, la fertilidad del suelo y la seguridad alimentaria.*

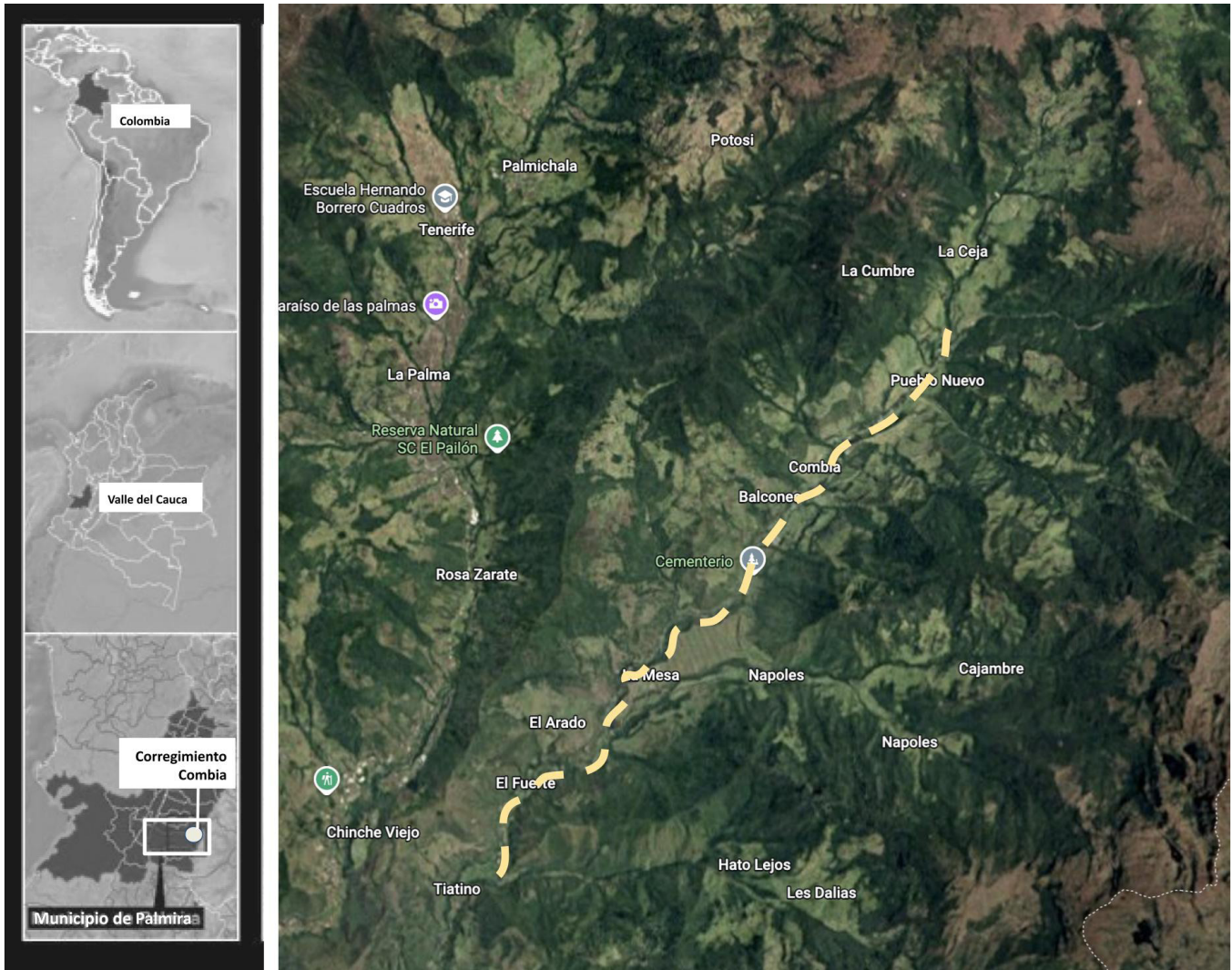


Figura 1. Área y corredor de estudio  
Fuente: Elaboración propia (2025) con información de Google.

sostenible del agua, la fertilidad del suelo y la seguridad alimentaria. En territorios rurales de Latinoamérica, experiencias vinculadas a captación de agua lluvia, sistemas agroecológicos verticales, compostaje y humedales artificiales han mostrado potencial para mejorar la capacidad adaptativa local cuando se articulan con saberes campesinos y prácticas tradicionales (Moreno et al., 2020).

No obstante, aún existe un vacío en estudios que integren la caracterización territorial de la vivienda rural campesina con la evaluación de su potencial adaptativo frente al CC. Gran parte de la literatura aborda la vivienda desde perspectivas arquitectónicas y sociales, mientras que los análisis de adaptación climática tienden a enfocarse en escalas regionales o ecosistémicas, sin descender al nivel de la unidad habitacional como nodo territorial estratégico (Eriksen, S., et al. 2021).

Más allá del diagnóstico local, la investigación busca aportar al debate latinoamericano sobre planificación rural adaptativa, entendida como un enfoque que reconoce la VRC como infraestructura socioecológica estratégica dentro de sistemas territoriales interconectados. El agua recolectada, por ejemplo, puede destinarse a tareas domésticas como el lavado de sanitarios y ropa, el riego de cultivos e incluso, con un filtrado adecuado, a la higiene personal (Betancur et al., 2025). Por otro lado, los jardines verticales tipo huerta permiten optimizar el uso del espacio mediante el cultivo en superficies verticales, lo que facilita la producción de alimentos en zonas reducidas y promueve la soberanía alimentaria. (Quimbay y Mogollón, 2019). El aprovechamiento de residuos orgánicos por medio de compostaje es otra alternativa con la cual se pueden descomponer los residuos orgánicos para producir compost, un material rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante o mejorador del suelo (Do-

Variable	Indicador		Medición de las características VRC e IPA	Unidad	Justificación
<b>Ubicación de la vivienda</b>	N.1	Altura (m.s.n.m.)	Alta (2306-2.553) = 1 Media (1989-2305) = 2 Bajo (1794-1988) = 3	m.s.n.m	Influye en el clima, la biodiversidad y el suelo.
	N.2	Relieve del terreno	Pendiente baja (0 - 25%) =4 Pendiente media (25 - 45%) =3 Pendiente alta (45 - 70%) =1	%	Influye en la exposición a los riesgos.
	N.3	Distancia al río	Lejos (> 100 m.) = 4 Medio (30 a 100 m.) = 3 Cerca (<30 m.) =1	metros	Influye en la susceptibilidad al riesgo y a la estabilidad de la vivienda
	N.4	Distancia a la carretera	Lejos (> 10 m.) = 4 Medio (3 m a 10 m.) = 3 Cerca (< 3 m.) = 1	metros	Influye en la contaminación por ruido, los accidentes y la contaminación por material particulado.
	N.5	Orientación solar (fachada principal de la vivienda)	Este (E) o Oeste (O) = 4 Noreste (NE) o Suroeste (SO)= 3 Norte (N) o Sur (S)= 2 Noroeste (NO) o Sureste (SE)= 1	-	Favorece el confort térmico.
<b>Predio donde se ubica la vivienda</b>	N.6	Tamaño o área del predio	Grande (> 1.500 m <sup>2</sup> ) = 4 Mediana (300 m <sup>2</sup> a 1500 m <sup>2</sup> ) = 3 Pequeña (< 300 m <sup>2</sup> ) = 1	metros cuadrados	Un predio con mayor extensión favorece la sostenibilidad productiva, soberanía alimentaria y resiliencia económica.
	N.7	Predio con árboles	Muchos (> 10) = 4 Algunos (5 y 10) = 3 Pocos (< 1) = 2 Ninguno= 1	N.º de individuos	Aumentan la biodiversidad, aportan sombra y estabilizan el suelo.
	N.8	Predio con plantas ornamentales	Muchos (> 15) = 4 Algunos (5 y 15) = 3 Pocos (< 5) = 2 Ninguno= 1	N.º de individuos	Favorece los hábitats seguros para los polinizadores y la biodiversidad.
	N.9	Predio con área de cultivo	Muchos (> 300 m <sup>2</sup> ) = 4 Algunos (Posee un área entre 100 m <sup>2</sup> a 300 m <sup>2</sup> ) = 3 Pocos (< 100 m <sup>2</sup> ) = 2 Ninguno (No posee cultivos en su predio) = 1	metros cuadrados	Posibilita la seguridad alimentaria e independencia económica familiar.
	N.10	Predio con especies menores (gallinas, conejos, cabras)	Muchos (>10 especies menores) = 4 Algunos (≥ 5 y ≤ 10 especies menores) = 3 Pocos (< 5 especies) = 2 Ninguno (No posee especie menor) = 1	N.º de individuos	Contribuyen a la alimentación; sus residuos son aprovechados para otras formas de economía familiar.
	N.11	Predio con especies mayores (vacas, cerdos, burros, caballos)	Muchos (>10 especies mayores) = 1 Algunos (≥ 5 y ≤ 10 especies mayores) = 2 Pocos (< 5 especies mayores) =3 Ninguno (No posee especie mayor) = 4	N.º de individuos	Erosión, compactación del suelo y contaminación del agua.
	N.12	Uso predominante del suelo	Árboles y cultivos=4 Cultivos y especies mayores=3 Especies mayores=2 Uso del suelo sin dominancia= 1	Tipos de uso	Influye en el equilibrio ecosistémico, productividad y bienestar

Variable	Indicador		Medición de las características VRC e IPA	Unidad	Justificación
Aspectos de la vivienda	N.13	Estado de la vivienda	Bueno=4 Regular=3 Malo =1	-	Afecta el bienestar de sus habitantes y responde mejor ante desastres naturales.
	N.14	Tamaño de la vivienda	Grande=4 Mediana= 3 Pequeño= 1	-	Influye en el bienestar de sus habitantes y la organización de las actividades.
	N.15	Material del techo (teja o cubierta)	Zinc= 4 Mixto (zinc y barro o zinc y eternit) =3 Eternit=2 Barro=1	-	Impacta la salud y la vida útil de la vivienda.
	N.16	Pendiente del techo	Alta=4 Medio=3 Plano= 1	-	Influye en el confort y funcionalidad.
	N.17	Material de las paredes de la vivienda	Ladrillo=4 Mixto=3 Madera=2 Bahareque=1	-	Afecta la vida útil y la multifuncionalidad de la vivienda.
	N.18	Sistema estructural (columnas y vigas visibles)	Concreto=4 Hierro= 3 Madera=2 Guadua=1	-	Influye en la estabilidad, larga vida y resistencia.

Tabla 1. Metodología para la caracterización de la VRC

Fuente: Elaboración propia (2025).

campo, 2013). Por su parte, los humedales artificiales son una tecnología empleada para la recuperación del recurso hídrico, mediante sistemas que aprovechan plantas acuáticas (macrófitas) para limpiar aguas residuales de forma natural y eficiente (Ruiz, 2019).

Este artículo propone calcular el Índice del Potencial de Adaptación al Cambio Climático (IPACC) de viviendas rurales campesinas (VRC) en Combia, Valle del Cauca, Colombia, a partir de un modelo de análisis que integra variables e indicadores. La hipótesis que orienta el estudio se fundamenta en que determinadas características físico-territoriales y constructivas de la VRC inciden directamente en el Potencial de Adaptación al Cambio Climático y en la capacidad de incorporar alternativas de bioingeniería.

## Materiales y Métodos

El conocimiento acumulado del territorio desde el año 2017, a partir de una relación sostenida con la comunidad campesina de alta montaña del corregimiento de Combia (Valle del Cauca), le ha permitido al Semillero de Investi-

gación Ambiental (SIAMB), Grupo de Investigación Prospectiva Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, desarrollar proyectos de investigación y extensión, bajo principios éticos de consentimiento informado y confidencialidad en el marco de diferentes convocatorias.

## Contexto Territorial de la VRC

El territorio, caso de estudio de la investigación, se localiza en la zona de alta montaña de la cuenca del río Amaime, municipio de Palmira, Valle del Cauca, Colombia, entre los 1,794 y 2,553 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 20.5 °C. Esta área hace parte de los suelos de protección localizados al borde de la zona amortiguadora del Parque Nacional Natural Las Hermosas. El corredor de estudio comprende aproximadamente 11 km, desde la escuela Teatino Rita Sabogal hasta la quebrada Las Auras, donde se identificaron 87 VRC. Estas fueron georreferenciadas mediante la aplicación Gaia GPS e integradas en Google Earth y junto con el trabajo de campo permitieron elaborar un mapa preciso para la investigación (ver Figura 1).

## Diseño del Método de Evaluación de las Características de la VRC

Para la recolección de información se diseñó una ficha con 18 indicadores asociados a tres variables: ubicación de la vivienda, características del predio e infraestructura. Estos indicadores fueron seleccionados con base en la revisión bibliográfica sobre VRC y adaptación territorial y ajustados con el conocimiento y la observación directa en campo.

### La ficha fue diligenciada en campo con recorridos guiados, encuestas y registro fotográfico.

A cada indicador se le asignó una valoración cualitativa en una escala de 1 (bajo) a 4 (alto). La estructura metodológica utilizada para la caracterización de la vivienda fue la base para la construcción del Índice de Potencial de Adaptación al Cambio Climático (IPACC) y el Potencial de Incorporación de Alternativas de Bioingeniería (PIAB) (ver Tabla 1).

### Cálculo del Índice de Potencial de Adaptación al Cambio Climático (IPACC) de la VRC

El IPACC de cada vivienda se obtuvo mediante la suma de los valores asignados a los 18 indicadores, con un rango posible entre 1 y 72 puntos, siendo 72 el valor máximo. Este puntaje fue interpretado como IPACC de la VRC.

Para el cálculo de este índice, los indicadores correspondientes a altura (m.s.n.m.) y tamaño de la vivienda fueron asignados de manera uniforme con un valor de 4. Si bien estas características pueden incidir en el potencial de incorporación de alternativas de bioingeniería (PIAB), no se consideraron determinantes para la IPACC en el marco del presente índice.

Con el fin de facilitar la interpretación y el análisis comparativo, los resultados se agruparon en tres niveles (bajo, medio y alto) mediante una división en terciles. Los puntos de corte se establecieron en 24 y 48 puntos, clasificando las viviendas en rangos bajos (1–24), medios (25–48) y altos (49–72). Esta categorización permitió una lectura sintética de la variable sin perder la variabilidad del conjunto.

### Potencial de Incorporación de Alternativas de Bioingeniería (PIAB) en la VRC

La identificación de alternativas de bioingeniería se realizó mediante una revisión bibliográfica en bases de datos académicas como Scielo, Web of Science, Scopus, Google Académico y repositorios universitarios. Se priorizaron estudios publicados en la última década, analizando te-

mas relacionados con la VRC, el CC y herramientas de bioingeniería. Entre ellas se encuentran los sistemas de recolección de agua lluvia, huertas verticales, humedales artificiales y compostaje.

El cálculo del PIAB se basó en los resultados del IPACC. A partir de estos puntajes, se seleccionó un subconjunto representativo de 22 viviendas (26 % de la muestra) mediante un criterio por percentiles: 10 con valores altos ( $P \geq 88$ ), 10 con valores bajos ( $P \leq 12$ ) y 2 cercanas a la mediana ( $P50$ ), lo que permitió contrastar condiciones extremas e intermedias (Hair et al., 2019).

Posteriormente, se aplicó una valoración multicriterio sustentada en 18 indicadores. Para cada alternativa, captación de agua lluvia, compostaje, huertas verticales y humedales artificiales, se definió un subconjunto de indicadores pertinente según su viabilidad técnica y funcional. Cada indicador fue valorado mediante una escala ordinal estandarizada (ver Tabla 1), donde los valores más altos representaron condiciones más favorables.

El puntaje total por alternativa y vivienda se obtuvo mediante la suma del valor asignado a cada indicador, estableciendo rangos teóricos mínimos y máximos para cada estrategia. Con base en estos rangos, se definieron terciles teóricos dividiendo la amplitud en tres intervalos iguales. Se consideró que una alternativa presentaba alto potencial de incorporación cuando su puntaje se ubicaba en el tercil superior, garantizando un criterio homogéneo y replicable de selección.

## Resultados y Discusión

### Análisis Territorial de las Viviendas Campesinas

La ubicación geográfica de las viviendas distribuidas a lo largo de la cuenca alta del río Amaime se encuentra un 42.5 % entre 1,988 y 2,306 m s. n. m. y un 32.2 % entre 2,307 y 2,553 m s. n. m. Adicionalmente, el 39.1 % de las VRC se localizan en pendientes escarpadas entre 25 y 45 %, lo que las hace más susceptibles al deslizamiento (CAR, 2008). Por otra parte, la orientación solar predominante de la fachada principal de las viviendas es suroeste y noreste (65.7%), respondiendo principalmente a la forma como se articulan con su entorno inmediato, condiciones que, en conjunto con la actual variabilidad climática, pueden incrementar su vulnerabilidad (IPCC, 2022).

Se identificó que el 87.3 % de las viviendas se encuentran a menos de 10 metros de la carretera, mientras que el 59.8 % están a más de 100 metros del río. Esta localización responde principalmente a los intereses de la po-

blación de evitar riesgos como desbordamientos y avenidas torrenciales, a la facilidad para acceder al transporte y movilizarse en busca de insumos básicos, así como a la disponibilidad de terreno. Con esta forma de ordenamiento, las VRC se alejan del cumplimiento de políticas y normas territoriales como la Constitución de 1991, Ley 99 de 1993 y la Ley 388 de 1997. A lo cual se añade el abandono histórico del gobierno hacia la población rural, con altos déficits de vivienda (DANE, 2020), así como la falta de reconocimiento de la VRC como patrimonio cultural vivo (Seddon et al., 2021).

En términos de actividad agropecuaria, el 71.3 % de los predios con vivienda presenta pequeños cultivos transitorios, lo que refleja una intervención agrícola de baja escala coherente con el uso rural tradicional y con menor transformación del paisaje frente a sistemas intensivos. Solo el 10.3 % corresponde a grandes cultivos. En cuanto a la actividad pecuaria, apenas el 2.3 % de los predios registra más de 10 especies mayores. Aunque este porcentaje es reducido, la literatura reconoce la ganadería como uno de los principales impulsores de deforestación, degradación del suelo y emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina (FAO, 2018). En este contexto, la baja presencia de sistemas pecuarios de mayor escala representa una oportunidad para promover prácticas de manejo sostenible que fortalezcan la ACC.

Estos hallazgos evidencian cómo la variedad de actividades productivas dentro de un mismo predio favorece la biodiversidad y la seguridad alimentaria (CadenaSER, 2025). La predominancia de un orden territorial en el que las viviendas se disponen siguiendo el curso de los ríos y las carreteras principales, integrándose al paisaje, muestra también un sistema de relaciones de la VRC con su entorno (Malo, 2020). Por otro lado, la escasa cobertura arbórea refleja el interés y la persistencia de la comunidad campesina por mantener la producción rural, incluso en condiciones de limitada extensión territorial (448 % son de pequeño tamaño <300 m<sup>2</sup>).

En línea con lo señalado, la VRC muestra su potencial para desarrollar economías circulares a pequeña escala (predial), que configuran sistemas territoriales híbridos, aportando una mayor sostenibilidad y menores impactos ambientales (Moreno et al., 2020). De igual manera, la VRC requiere de estrategias que impulsen con mayor fuerza su ACC, en el marco de una inmersión versátil, de acuerdo con sus intereses y contexto (Echeverría, 2022).

### Evaluación de las Características de la VRC

Al analizar los materiales predominantes en las paredes de las viviendas, observamos que el 32.2 % utilizan ladrillo, madera (28.7 %) y bahareque (27.6 %), los cuales cons-

tituyen materiales de origen local, presentes también en otras geografías. Las viviendas construidas con ladrillo probablemente ofrecen mayor resistencia y durabilidad, lo que las hace más seguras frente a condiciones climáticas adversas (GlobalABC, 2021). El uso de madera y bahareque, aunque tradicionales y más asequibles, podría indicar una mayor vulnerabilidad estructural frente a sistemas o fuertes vientos y precipitaciones, especialmente en el caso del bahareque.

De acuerdo con los datos recopilados, se observa que el 67.8 % de los techos están contruidos con zinc, un material accesible y duradero, adecuado para la recolección de agua lluvia (Arboleda, 2016). Su resistencia, facilidad de instalación y bajo costo lo convierten en una de las opciones más utilizadas por las familias (Tiwari et al., 2024). Por otro lado, el 47.1 % de las viviendas tienen techos con una pendiente media, inclinación adecuada que facilita el flujo del agua lluvia para su recolección y aprovechamiento, especialmente en zonas rurales con acceso limitado al servicio continuo de agua potable (Betancur et al., 2025).

El 70.1 % de las VRC se encuentra en buen estado, evidenciando condiciones estructurales adecuadas para incorporar elementos livianos para las alternativas de bioingeniería. Al contrastar este resultado con la ubicación se observó que no presenta una relación directa con la altitud. Este hallazgo sugiere que los materiales y el estado constructivo de la VRC no dependen exclusivamente de la altura o la lejanía a los centros urbanos, sino de factores locales asociados a las capacidades familiares y a las dinámicas territoriales.

En síntesis, son amplias las posibilidades de que las VRC se interesen por insertar las diferentes alternativas de bioingeniería como parte de su forma de vida, más integrada al paisaje y a su entorno local (Malo, 2020). Esta disposición (ver Figura 2) también evidencia la posibilidad de contribuir a paisajes más sostenibles, donde la bioingeniería ofrece una amplia gama de beneficios que incluye también a los ecosistemas degradados (Cumming y Epstein, 2020).

Es por ello por lo que es prioritario contar con programas estatales que mejoren las condiciones de las construcciones para favorecer el bienestar de la población rural y contribuir a la protección de la VRC como patrimonio cultural. A la vez, que se puede mejorar la estabilidad de la población, en un ecosistema estratégico, que insertando alternativas de bioingeniería favorece de manera decisiva la sostenibilidad ambiental y la adaptación al CC (Moreno et al., 2020)

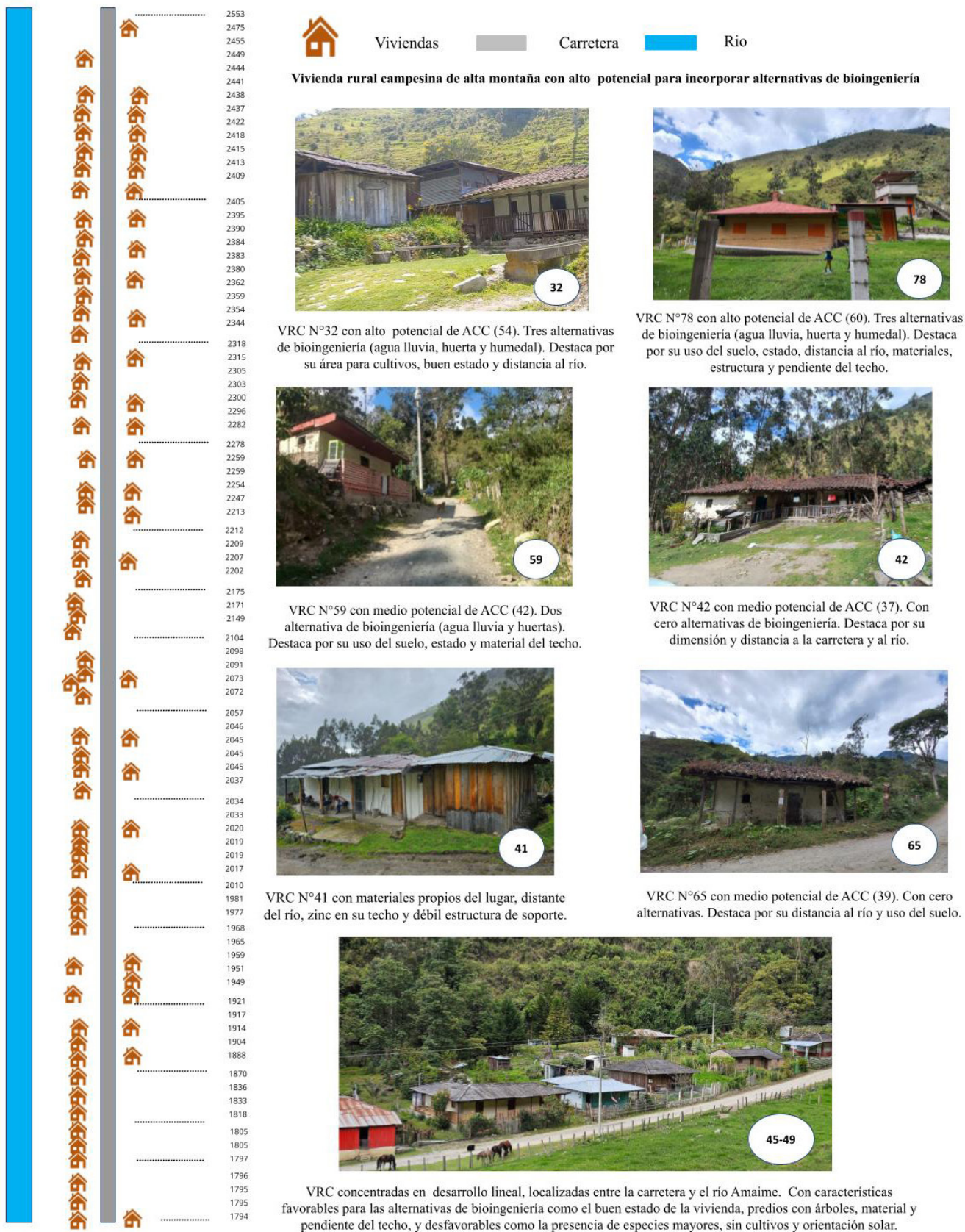


Figura 2. Distribución espacial y características de la VRC  
Fuente: Elaboración propia (2025).

CASA		78	85	18	84	19	12	3	32	7	56	53	20	43	49	59	39	61	34	65	42	22	35
INDICE DE POTENCIAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO (IPACC)	N.1	2	1	2	1	2	1	1	3	1	3	3	2	3	3	3	3	2	3	2	3	2	3
	N.2	4	4	4	3	3	4	3	4	3	1	3	4	3	3	3	4	3	2	4	3	1	1
	N.3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	1	3	4	3	4	4	3	4
	N.4	3	4	3	4	4	1	3	3	3	1	4	3	3	3	1	1	1	1	1	1	3	1
	N.5	2	2	1	3	1	1	2	1	2	1	2	3	3	3	3	3	1	3	3	3	1	1
	N.6	3	4	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	N.7	3	3	4	2	4	3	2	2	2	3	4	3	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
	N.8	3	3	3	2	1	3	2	3	3	3	4	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2
	N.9	3	3	3	4	1	2	4	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	N.10	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2
	N.11	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	N.12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	N.13	4	4	1	3	4	4	4	4	4	3	4	3	3	4	3	4	3	3	4	1	1	2
	N.14	3	4	1	3	1	1	3	3	3	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1
	N.15	4	1	4	3	3	4	4	4	3	4	4	4	4	2	4	4	4	3	3	3	1	2
	N.16	4	3	3	1	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	3	1
	N.17	4	4	4	4	4	4	4	1	3	4	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2
	N.18	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

POTENCIAL DE INCORPORACIÓN DE ALTERNATIVAS DE BIOINGENIERÍA (PIAB)																							
Indicadores favorables	Min-Max	60/Alt	59/Alt	56/Alt	56/Alt	55/Alt	55/Alt	52/Alt	54/Alt	54/Alt	54/Alt	49/Alt	47/Alt	42/Alt	42/Alt	42/Alt	41/Alt	40/Alt	39/Alt	39/Alt	37/Alt	37/Alt	36/Alt
AGUA																							
LLUVIA (N.1, N.3, N.13, N.15, N.16 y N.18)	6-23	22	20	21	19	23	24	22	23	22	21	21	22	20	17	20	21	17	19	17	16	14	18
COMPOSTAJE (N.2, N.6, N.9, N.10, N.11 y N.12)	6-24	17	20	18	18	15	16	17	17	16	14	14	14	11	13	12	11	11	11	12	9	10	7
HUERTAS VERTICALES (N.3, N.5, N.13 y N.18)	4-16	14	13	9	14	13	13	11	12	12	12	11	10	12	9	12	10	11	11	10	9	9	10
HUMEDALES (N.3, N.6 y N.14)	3-12	10	11	8	11	8	8	10	10	9	11	8	8	7	3	5	6	5	6	6	7	6	6
ALTERNATIVAS DE BIOINGENIERÍA FAVORABLES																							

Figura 3. Valoración de las características de las VRC y cálculo de IPACC y PIAB  
 Fuente: Elaboración propia (2025).

## Evaluación de la Potencialidad de la VRC para la ACC.

El IPACC fue aplicado en 87 VRC, con un rango teórico de 1 a 72 puntos, clasificándose en tres niveles mediantes terciles: bajo (1–24), medio (25–48) y alto (49–72). El uso de índices compuestos basados en la agregación de indicadores es una metodología ampliamente utilizada para integrar dimensiones de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa, lo cual ha sido enfatizado en marcos conceptuales recientes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2022), que resaltan la necesidad de considerar múltiples factores socio-ecológicos para evaluar la capacidad de un sistema para responder y ajustarse a cambios ambientales crecientes. Desarrollos metodológicos recientes han aplicado marcos integrados de evaluación de vulnerabilidad que combinan indicadores de sensibilidad y adaptabilidad para identificar prioridades territoriales de adaptación (Pérez et al., 2025). Sin embargo, los resultados empíricos muestran que los puntajes obtenidos por las viviendas oscilaron entre 36 y 60 puntos, lo que evidencia que ninguna casa se ubicó en el tercil inferior. Esta distribución indica que, dentro del contexto territorial analizado, no existen condiciones estructurales críticas que limiten de manera severa la capacidad adaptativa básica.

La concentración del 50% de las VRC evaluadas en el nivel alto sugiere que el territorio presenta una base adaptativa relativamente consolidada. Este comportamiento puede asociarse a la presencia de predios con cobertura vegetal, áreas de cultivo activas, diversidad en el uso del suelo y condiciones constructivas estables, factores que han sido identificados como determinantes de resiliencia y capacidad de adaptación en comunidades rurales productoras frente a riesgos climáticos recientes (Aqib et al., 2023).

Las viviendas clasificadas en nivel medio se sitúan en el 50% restante del rango observado. La ausencia de valores en el rango bajo no implica homogeneidad absoluta, sino que revela que incluso las viviendas con menor puntaje mantienen condiciones mínimas favorables para procesos adaptativos, configurando un escenario de vulnerabilidad moderada más que estructural. En términos prácticos, el territorio no requiere intervenciones correctivas urgentes, sino estrategias de fortalecimiento y optimización de capacidades existentes (Berrang et al., 2021).

## Incorporación de las Alternativas de Bioingeniería

La Figura 3 muestra el comportamiento de los 18 indicadores en 22 de las 87 viviendas. Estas corresponden a una selección representativa mediante percentiles, teniendo en cuenta la valoración de la ACC, evidenciando patrones contrastantes entre los casos con mayor, mediano y menor desempeño de los indicadores. En las vivien-

das ubicadas en los percentiles superiores es notoria una concentración predominante de IPACC altos y medios, lo que se traduce en un mayor número de alternativas de bioingeniería con posibilidades de incorporación.

La evaluación PIAB en la muestra (22 VRC) evidenció una distribución heterogénea en número y tipo. El 27% de las viviendas mostró capacidad para integrar tres o cuatro alternativas, lo que indica condiciones físicas, estructurales y territoriales favorables para soluciones multifuncionales. Por otro lado, el 50% se concentró en integrar entre 1 o 2 alternativas, y el 23% restante no mostró condiciones adecuadas para la incorporación de ninguna. Esta distribución sugiere una gran variabilidad del PIAB que a su vez condicionan las posibilidades de adaptación.

La alternativa de recolección de agua lluvia fue la más favorecida con un 77.27%. Esta depende de la evaluación de los indicadores de altura, estado y estructura de la construcción, material y pendiente del techo y distancia a fuentes hídricas. Adicionalmente, influyen como factores relevantes las condiciones del contexto territorial derivadas del clima y específicamente de la precipitación, la altitud, la infraestructura disponible para la canalización y el almacenamiento, la falta de infraestructura de acueductos rurales, de tanques de almacenamiento y las condiciones de salud del ecosistema que ofrecen un recurso lluvia con altos niveles de calidad.

Estudios desarrollados en Brasil han demostrado que la captación pluvial doméstica evaluada desde una perspectiva técnica y económica puede reducir la dependencia de fuentes convencionales y mejorar la seguridad hídrica en contextos con variabilidad climática. Castier y Barreto (2023) evidencian que, incluso bajo diferentes regímenes de precipitación, los sistemas de captación en cubierta presentan viabilidad económica y aportan resiliencia frente a escenarios de escasez, lo que refuerza la pertinencia de su implementación en VRC con régimen de lluvias constante como es el caso de Combia. Sampaio et al. (2022) documentaron experiencias en zonas rurales donde la calidad del agua recolectada resultó adecuada para diversos usos domésticos y productivos, fortaleciendo la resiliencia comunitaria ante periodos de irregularidad climática. Adicionalmente, se puede reducir la presión sobre los nacimientos hídricos, asegurar el abastecimiento hídrico sostenible de las viviendas y controlar los flujos de agua superficial que erosionan los suelos de base como se evidenció en Guaratinguetá en Brasil, con experiencias que demuestran su eficacia al reducir la sedimentación, restaurar procesos ecológicos y mejorar la recarga de acuíferos (Souza et al., 2024).

La alternativa de huertas verticales es la segunda alternativa más recurrente con un 45.45 %. Esta responde a la

evaluación de los indicadores de estado de la construcción, disponibilidad estructural para soportar instalaciones, orientación solar y acceso al agua. Adicionalmente, se tuvo en cuenta la relevancia para las familias de las plantas de jardín y la costumbre de preparar los alimentos en casa, muchos de ellos con insumos de producción local, evidenciados en los recorridos y a través del contacto con las familias.

Estudios como el de Glaros et al. (2024) demuestran que los sistemas de agricultura vertical contribuyen a descentralizar la producción de alimentos y a fortalecer la resiliencia de los sistemas alimentarios locales frente a perturbaciones climáticas o logísticas. Otros destacan su capacidad para maximizar la producción en espacios reducidos y con menor uso de agua y suelo, relevante en viviendas rurales con limitaciones de área cultivable o variabilidad en la disponibilidad hídrica (Erekath, 2024). De igual forma, a escala doméstica, pueden mejorar la seguridad y diversidad alimentaria, reforzando su pertinencia como estrategia de ACC (Otieno, 2025). En el caso específico de la investigación, donde las viviendas presentan condiciones favorables, las huertas permitiría intensificar la producción hortícola sin requerir áreas adicionales ni expansión horizontal del cultivo, fortaleciendo la autosuficiencia alimentaria y diversificando los medios de vida.

La alternativa de humedales artificiales fue la tercera alternativa más favorable con un 31.82 %. En esta, fueron los indicadores más favorables la cercanía a cuerpos de agua para mantener un nivel freático que no fluctúe drásticamente y facilitar su integración con drenajes naturales, el tamaño de la vivienda (relacionado con la cantidad de producción de vertimientos por número de personas) y la disponibilidad de área suficiente para su construcción. También, la literatura dispone de la importancia de contar con suelos con capacidad de retención e infiltración.

Esta alternativa se ha evidenciado como una solución para el tratamiento de aguas residuales domésticas y gestión de recursos hídricos en comunidades rurales mediante procesos físico-químicos y biológicos con un alto porcentaje de remoción de contaminantes sin necesidad de sistemas centralizados, lo que resulta especialmente pertinente donde la infraestructura convencional es inexistente o costosa (Deister & Oliveira, 2020). Desde la perspectiva del agua-suelo-energía, otros estudios señalan que no solo mejoran la calidad del agua y reducen cargas contaminantes, sino que también reducen el uso de energía y las emisiones de carbono en comparación con sistemas convencionales (Zhao et al., 2025). Esta alternativa puede integrarse en Combia para mejorar las condiciones ambientales y fortalecer las capacidades adaptativas de las VRC frente a condiciones climáticas cambiantes e infraestructura limitada.

El compostaje aparece como la última alternativa más recurrente con el 13.64% de las VRC. Este resultado corresponde a los indicadores más favorables para este tipo de bioingeniería que son la disponibilidad de residuos orgánicos generados por las actividades agrícolas y aprovechados en las mismas, el relieve y la existencia de espacios adecuados para la instalación y mantenimiento del sistema. Respaldo también por las condiciones culturales del hábito familiar de cocinar con alimentos básicos naturales desprovistos de empaques artificiales y la limitada frecuencia del servicio de recolección de residuos municipales.

En diferentes regiones agrícolas evaluadas por Iraj et al. (2025), la aplicación sistemática de compost en suelos cultivados incrementó significativamente la retención hídrica, mejoró la estabilidad estructural del suelo y redujo la susceptibilidad a la erosión, factores determinantes para enfrentar escenarios de variabilidad climática. Estudios experimentales documentados por Álvarez et al. (2025) demostraron que el compost producido bajo modelos descentralizados mejoró la resiliencia fisiológica de cultivos frente a estrés hídrico y salinidad, incrementando su capacidad de recuperación después de eventos extremos. Este tipo de evidencia es particularmente relevante para Combia, donde la variabilidad en la disponibilidad de agua y la gestión de residuos puede afectar los sistemas productivos.

Los datos analizados permiten afirmar que al integrar las alternativas de bioingeniería en el corregimiento de Combia. Todas estas posibilidades reales de modelos de adaptabilidad y sostenibilidad en espacios híbridos de habitación, producción y protección contribuirían a mejorar la condición de patrimonio cultural rural de manera significativa (Seddon et al., 2021).

## Conclusiones

---

Con base en el IPA y su relación con las condiciones específicas de cada vivienda, se estimó el Potencial de Incorporación de las Alternativas de Bioingeniería (PIAB) evaluadas (agua lluvia, las huertas verticales, el compostaje y los humedales artificiales) como soluciones basadas en la naturaleza, lo que permitió identificar las estrategias más adecuadas para cada caso.

Los sistemas de recolección de agua lluvia fueron los de mayor posibilidad de aplicación, seguidos las huertas verticales, humedales artificiales y, en menor medida, por el compostaje. Reconocer las oportunidades de la VRC para incorporar las alternativas de bioingeniería permitirá elevar su visibilidad como un sistema híbrido

(vivienda-producción-conservación) resaltando el patrimonio cultural rural con acciones efectivas que aseguren su sostenibilidad y la ACC. De esta manera se reducirá el impacto negativo sobre territorios de gran fragilidad ecológica, que son además proveedores de importantes servicios ecosistémicos. Estas condiciones pueden ser las bases para avanzar hacia modelos de VRC que se repliquen a diferentes escalas y en diferentes territorios de la región Andina de Colombia y Latinoamérica.

Desde una perspectiva territorial, el desplazamiento completo de la muestra hacia el tercil medio-alto teórico durante la evaluación del potencial de adaptación al CC puede interpretarse como un indicador de resiliencia rural estructural, asociada a sistemas productivos familiares, baja densidad constructiva, presencia de cobertura vegetal y relaciones relativamente equilibradas entre vivienda y entorno natural. Esta condición genera un escenario propicio para la incorporación de estrategias complementarias.

El éxito de la puesta en marcha de alternativas de bioingeniería para VRC con el acompañamiento de la academia dependerá de la voluntad y el fortalecimiento de las capacidades locales y de su articulación con las políticas, normas y apoyos gubernamentales. Así, encontrar las estrategias adecuadas para vincular estas iniciativas al PN-ACC y al cumplimiento de los ODS será una estrategia multi impacto que contribuirá al bienestar de la población rural y al cumplimiento de los retos del país frente a los compromisos internacionales.

## Referencias

- ARBOLEDA, N. (2016). Diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de la comunidad negra de Los Lagos, Buenaventura. *Luna Azul*, (43), 29–55. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.3>
- ÁLVAREZ, C., NOGUES, I., PALLOZZI, E., STEFANONI, W., PIETRINI, F., SOSA, L., MANRIQUE-CÓRDOBA, N., PEREZ, M. D., MORAL, R., & BUSTAMANTE, M. A. (2025). Impact of composts from decentralized composting models on *R. officinalis* physiology and nutrient contents under abiotic stress. *Journal of Environmental Management*, 392, 126935. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126935>
- AQIB, S., SERAJ, M., HUSEYIN, O., KHALID, S. HASEEB, M., & AHMAD, T. (2024). Assessing adaptive capacity of climate vulnerable farming communities in flood-prone areas: Insights from a household survey in South Punjab, Pakistan. *Climate Services*, Volume 33. <https://doi.org/10.1016/j.ciser.2023.100444>.
- BERRANG, L., SIDERS, A., LESNIKOWSKI, A., FISCHER, A., CALLAGHAN, M., HADDAWAY, N., ... & PÖRTNER, H. (2021). A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, 11, 989–1000. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01170-y>
- BETANCUR, H., RAMOS, E., QUISPE, G., GUTIÉRREZ, A., & MENDOZA, A. (2025). Arquitectura vernácula altoandina: Diseño sostenible para comunidades saludables, inclusivas y sostenibles. *Revista de Estilo de Vida y Revisión de los ODS*, 5(2), e04393. <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n02.pe04393>
- CADENA SER. (2025). El Campus de Huesca analiza la producción conjunta de vegetales y peces como alternativa de generación de alimentos. *Radio Huesca*. <https://cadenaser.com/aragon/2025/03/12/el-campus-de-huesca-analiza-la-produccion-conjunta-de-vegetales-y-peces-como-alternativa-de-generacion-de-alimentos-radio-huesca>
- CASTIER, M., & DE BARROS, P. (2023). Economic attractiveness of domestic rainwater harvesting in Brazilian cities. *Discover Water*, 3, Article 9. <https://doi.org/10.1007/s43832-023-00033-1>
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA (CAR). (2008). *Resolución 1574 de 2008*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/resolucion\\_car\\_1574\\_2008.htm](https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/resolucion_car_1574_2008.htm)
- CUMMING, G., & EPSTEIN, G. (2020). Landscape sustainability and the landscape ecology of institutions. *Landscape Ecology*, 35(12), 2781–2792. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00989-8>
- DANE. (2020). *Déficit habitacional 2018*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/deficit-habitacional/deficit-hab-2020-presentacion.pdf>
- DEISTER, F. & OLIVEIRA, E. (2020). Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. *Environmental Research*, Volume 190. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110016>.
- DOCAMPO, R. (2013). Compostaje y compost. *Revista INIA (Uruguay)*, 35, 63–67. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1839/1/128221231213112259.pdf>
- ECHEVERRÍA, P. (2022). *Vivienda rural, herramienta de recuperación y preservación de la entidad campesina en el municipio de Paipa, Boyacá*. [Tesis de grado, Universidad La Salle]. Repositorio Ciencia La Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=3413&context=arquitectura>
- EREKATH, S., SEIDLITZ, H., SCHREINER, M., & DREYER, C. (2024). Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. *Sustainable Cities and Society*, Volume 106, ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105357>.
- ERIKSEN, S., SCHIPPER, E., SCOVILLE, M., VINCENT, K., ADAM, BROOKS, N., HARDING, B., KHATRI, D., LENAERTS, L., LIVERMAN, D., MILLS, M., & WEST, J. (2021). *Adaptation interventions and their effect on vulnerability in developing countries: Help, hindrance or irrelevance?* *World Development*, 141, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105383>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). (2018). *The future of food and agriculture Alternative pathways to 2050*. Rome: FAO. <https://www.fao.org/3/i8429EN/i8429en.pdf>
- GLAROS, A., NEWELL, R., BENYAM, A., PIZZIRANI, S., & NEWMAN, L. (2024). Vertical agriculture's potential implications for food system resilience: outcomes of focus groups in the Fraser Valley, British Columbia. *Ecology and Society*, 29(1), Article 12. <https://doi.org/10.5751/ES-14547-290112>
- GLOBALABC. (2021). Climate Change and the Built Environment: An assessment of climate risks and adaptation opportunities for the buildings and construction sector. *Global Alliance for Buildings and Construction*. <https://globalabc.org/sites/default/files/2021-02/Buildings%20and%20Climate%20Change%20Adaptation%20-%20FULL.pdf>
- HAIR, J., BLACK, C., BABIN, B., & ANDERSON, R. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- IRAJI, F., JIMÉNEZ, R., MONGIL, J., PELLEJERO, G., MIGUÉLEZ, D., NAJAFI, P., & GONZÁLEZ, J. (2025). The effects of compost application on soil properties: Agricultural and environmental benefits. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 14(4). <https://doi.org/10.57647/ijrowa-2025-8144>
- MALO, G. (2020). Entre la forma de habitar y las formas para habitar. Vivienda campesina y arquitectura vernácula: nociones morfológicas. *Cuadernos Del Centro De Estudios De Diseño Y Comunicación*, (86). <https://doi.org/10.18682/cdc.vi86.3780>
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2025). *Impacto del cambio climático en Colombia*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico/que-es-cambio-climatico/impacto-del-cambio-climatico-en-colombia>
- MORENO, P., MORERA, M., & PRIETO, J. (2020). *Vivienda fértil: una vivienda rural, sostenible y adaptable*. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=3266&context=arquitectura>
- OTIENO, J., OMIÁ, D., & AMWATA, D. (2025). Vertical gardening undergirds household food security: evidence from Nairobi's Kibera informal settlements. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 9:1654777. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1654777>
- PÉREZ, A., VARGAS, V., & ROSERO, D. (2025). Development of a climate vulnerability index for community aqueducts in tropical Andean watersheds using fuzzy logic: an application in Colombia. *Natural Hazards* 121, 21059–21095. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07603-7>
- PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO (PNACC). (2021). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico/>
- QUIMBAY, Y., & MOGOLLÓN, E. (2019). La agricultura vertical como estrategia para garantizar la seguridad alimentaria en términos de abastecimiento y calidad de productos en el municipio de Gachetá, Cundinamarca [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. *Repositorio Institucional UNAD*. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/28457>
- RUIZ, F. (2019, FEBRERO 15). *Humedal artificial: una propuesta para el manejo de aguas residuales*. Noticias UCR. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/2/15/humedal-artificial-una-propuesta-para-el-manejo-de-aguas-residuales.html>
- SAMPAIO, C., TEREZO, R., IDE, G., SPANHOLI, MATOS, F., & BURGARDT, T. (2022). Rainwater harvesting roofs: Insights of water quality and potential usage in rural areas. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 21(3), 354–359. <https://doi.org/10.5965/223811712132022354>
- SEDDON, N., SMITH, A., SMITH, P., KEY, I., CHAUSSON, A., GIRARDIN, C., & TURNER, B. (2021). *Getting the message right on nature-based solutions to climate change*. *Global Change Biology*, 27(8), 1518–1546. <https://doi.org/10.1111/gcb.15513>
- SOUZA, G., BRESSANE, A., MOTTA, M., MEDEIROS, L., NEGRI, R., & URBAN, R. (2024). Nature-based solution using a bioengineering strategy for soil erosion control in tropical climate with intense rainfall patterns. *Nature-Based Solutions*, 5, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100130>
- TIWARI, S., ROY, K., FANG, Z., & LIM, J. (2024). Metal roof cladding system under wind loading: State-of-the-art. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105939>
- ZHAO, X., YANG, J., HAN, R., LUO, H., CHEN, L., LIU, M., & HE, B. (2025). Modular Constructed Wetlands for Treatment of Rural Domestic Wastewater: Laboratory Performance and Field Application. *Sustainability*, 17(10), 4427. <https://doi.org/10.3390/su17104427>