



Modelo para la compensación ecológica en la gobernanza de proyectos mediante la
predicción de métricas de CO₂ equivalente

Diana Patricia Franco Campos

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Gerencia de Proyectos
Bogotá, Colombia
2026

Modelo para la compensación ecológica en la gobernanza de proyectos mediante la
predicción de métricas de CO₂ equivalente

Diana Patricia Franco Campos

52360694

Grupo de Investigación:

INDEVOS

Director: Milton Januario Rueda Varón

Línea de Investigación:

Soluciones basadas en la naturaleza y cambios transformativos hacia la sostenibilidad

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Gerencia de proyectos

Bogotá, D.C., Colombia

2026

Tabla de contenido

1.	Introducción	11
1	Capítulo 1. Propósito y organización.....	15
1.1	Planteamiento del problema.....	15
1.1.1	La huella organizacional y de carbono en la gestión de proyectos:	21
1.1.2	La regulación referida a la compensación ecológica en la ejecución de proyectos	25
1.1.3	Sostenibilidad en las principales metodologías y estándares empleados en la gobernanza de proyectos.....	28
1.1.4	La compensación ecológica presente en los estándares y metodologías empleados en la gobernanza de proyectos:.....	31
1.2	Propósito de la investigación	35
1.3	Objetivos.....	36
1.3.1	Objetivo general.....	36
1.3.2	Objetivos específicos	36
1.4	Justificación	38
1.5	Alcance de la Investigación y limitaciones.....	50
1.6	Organización del estudio.....	52
2	Capítulo Marco teórico	54
2.1	Fundamentos Conceptuales, Métrica de Compensación y el Compromiso Bioético	54
2.1.1	Compensación ecológica.	55
2.1.2	Deterioro ecológico.	58
2.1.3	El CO ₂ eq como Variable Métrica Central	59
2.1.4	Créditos de Carbono: Instrumento Financiero y Evidencia de Mitigación.	61
2.1.5	La Bioética, un enfoque en la calidad y co-beneficios	65
2.2	Estado del arte, y la triple brecha: de la limitación disciplinar a la necesidad del modelado predictivo.....	68
2.2.1	El Vacío de un Enfoque de Compensación en los Estándares de la Gerencia de Proyectos.	68
2.2.2	De la Intención Metodológica a la Operacionalización.....	76
2.2.3	Modelos Financieros y el Déficit de la Ganancia Ecológica Neta	77
2.2.4	De la Fragmentación a la Exigencia de Estabilidad Predictiva de un modelo de uso general en la gerencia de proyectos.....	78
2.2.5	Definición y Fundamento de las Variables para el Modelo Predictivo ...	82
3	Capítulo Metodología	97
3.1	Enfoque de investigación.....	97
3.2	Tipo y diseño de investigación	98
3.3	Alcance de la estudio	99
3.3.1	Límites del modelado estadístico.....	99

3.3.2	Alcance operacional en la gobernanza de proyectos	100
3.3.3	Delimitación de la variable dependiente.....	100
3.4	Temporalidad de la investigación	100
3.5	Variables de estudio.....	102
3.5.1	Variable dependiente en el modelo de compensación.....	102
3.5.2	Variables independientes en el modelo de compensación.....	103
3.6	Hipótesis	106
3.7	Muestra (n):.....	108
3.8	Diseño del instrumento	109
3.9	Validez del instrumento.	112
3.9.1	Validez de constructo: estructura del enfoque de regularización	112
3.9.2	Validez de criterio y convergencia: entorno de implementación analítica 113	
3.9.3	Validez empírica: protocolo de validación fuera de muestra	113
3.10	Validez de confiabilidad del modelo y de los datos	114
3.11	Aplicación del instrumento	118
3.12	Preparación y procesamiento de datos.....	120
3.13	Modelo conceptual de la investigación.....	131
3.14	Técnica de análisis de datos.....	133
3.15	Análisis de Componentes Principales (ACP)	134
3.16	Técnicas e instrumentos de investigación.....	136
3.17	Paradigma de investigación	139
3.18	Naturaleza de la investigación	141
3.19	Herramienta metodológica para la revisión de literatura	143
3.20	Participantes:.....	144
4	Capítulo Resultados	146
4.1	Caracterización de la muestra	146
4.1.1	Distribución por estándares de registro	146
4.1.2	Representatividad geográfica y sectorial	147
4.1.3	Comportamiento de las variables predictoras.....	147
4.1.4	Tipo de muestra y criterios de inclusión.....	148
4.2	Objetivo específico 1	149
4.3	Objetivo específico 2	151
4.4	Objetivo específico 3	155
4.4.1	Construcción del Modelo de Compensación Ecológica para la Gobernanza de Proyectos	155
4.4.2	Modelo de Regresión.....	156
4.4.3	Modelo Random Forest	167
4.4.4	Regresión con Regularización: Lasso, Ridge y Elastic Net	177
4.5	Justificación argumentativa en la elección del modelo óptimo:	210
4.6	Objetivo específico 4	211
4.6.1	Protocolo de Validación con Datos Históricos.....	213
4.6.2	Casos Prácticos: Decisión de Inversión en un Proyecto de Compensación 222	
4.6.3	Escenario gerencial.....	222

4.7 Validación de las Hipótesis.....	234
4.7.1 1. Hipótesis Nula H0.....	234
4.7.2 Hipótesis Alterna HA1	237
4.7.3 Hipótesis Alterna HA2	241
4.7.4 Hipótesis Alterna HA3	244
4.7.5 Relevancia Metodológica: Validación de la Parsimonia	246
5. Discusión de los resultados.....	251
6. Contribuciones originales	259
7. Conclusiones	267
8. Declaración de uso ético de herramientas digitales	271

Lista de tablas

Tabla 1 Justificación técnica para el uso de CO ₂ eq en el modelo de compensación ecológica....	60
Tabla 2 Estándares y metodologías empleadas en la gerencia de proyectos y su dimensión ambiental desde la perspectiva de la compensación ecológica.....	70
Tabla 3 Variables Cuantitativas: El Capital de Carbono (Predictores de Peso)	87
Tabla 4 Justificación metodológica y conceptual de las variables incluidas en el modelo de compensación.....	92
Tabla 5 Operacionalización de la variable dependiente	103
Tabla 6. Operacionalización de las variables independientes.....	103
Tabla 7 Depuración de las variables de la base de datos Berkeley no incluidas en la modelación	121
Tabla 8: Variables seleccionadas de la base de datos Berkeley para su inclusión en el modelado.	123
Tabla 9 Variables numéricas incluidas en la modelación.....	125
Tabla 10 Variables categóricas empleadas en la modelación.	125
Tabla 11 Proceso de codificación de las variables para incluir en el software R	126
Tabla 12 Componentes del Modelo de Compensación Ecológica en la Gobernanza de Proyectos	128
Tabla 13 Participantes en el desarrollo del modelo de compensación ecológica en la gobernanza de proyectos	145
Tabla 14 Comparativo entre el tratamiento de la sostenibilidad y compensación ecológica en distintos estándares	149
Tabla 15 Países con mayor efecto negativo de disminución de CO ₂	163
Tabla 16 Países con menor efecto negativo de emisiones CO ₂	164
Tabla 17 Ranking de importancia de las variables por SHAP.....	174
Tabla 18 Valor agregado de Elastic Net en la elección del desarrollo del modelo de compensación ecológica	185
Tabla 19 Compilación de los principales resultados del modelo Elastic Net	207
Tabla 20. Partición de datos de entrenamiento del conjunto de datos disponible.	214
Tabla 21. Uso de hiperparámetros óptimos para la validación del modelo.	216
Tabla 22. Benchmarking y Confrontación Metodológica.....	217
Tabla 23. Debilidades del Random Forest y justificación de Elastic Net.....	220

Tabla 24. Datos para la decisión de proyecto de compensación.....	223
Tabla 25. Coeficientes β para la elección del proyecto	223
Tabla 26. Información del proyecto de compensación en Taiwán	226
Tabla 27. Aplicación de L1 con los datos disponibles.....	227
Tabla 28. Coeficientes explicados en la predicción de la compensación (Caso 2).....	227
Tabla 29. Criterios de retención/eliminación de factores para la predicción.....	230
Tabla 30. Inclusión de los valores RLM en la predicción	231
Tabla 31 Comparación y elección del modelo óptimo	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 32 Resumen de la validación de la hipótesis nula	234
Tabla 33 Hipótesis nula e implicación práctica para el gerente de proyectos	236
Tabla 34 Resumen de la validación en el modelo de la hipótesis alterna H1	237
Tabla 35 Resumen de la validación en el modelo de la hipótesis alterna H2	242
Tabla 36 Resumen de la comparación del rendimiento métrico con Elastic Net	243
Tabla 37 Resumen de la validación en el modelo de la hipótesis alterna H3	245
Tabla 38 Variables contenidas en la base de datos de compensaciones de registro voluntario v2025-04, Proyecto de comercio de carbono Berkeley	287

Lista de ecuaciones

Ecuación 1: Modelo de regresión para la reducción de emisiones.	166
Ecuación 2 Modelo empleando Random Forest	167
Ecuación 3 Modelo Elastic Net.....	179
Ecuación 4 Minimización de la función del costo con Elastic Net.....	179

Lista de figuras

Figura 1 <i>Trabajos referidos a los modelos de compensación ecológica</i>	48
Figura 2 Fase 1 de la metodología PRiSM	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. <i>Triple línea base en la gobernanza de proyectos y la sostenibilidad.</i> ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 4 <i>Metodología para el desarrollo de los objetivos</i>	129
Figura 5 Modelo de regresión	157
Figura 6 Modelo de regresión ajustado.....	160
Figura 7 Comportamiento de la variable país respecto a la variable de compensación	165
Figura 8 Diagrama de flujo del modelo Random Forest.....	170
Figura 9 Árbol de decisión individual simplificado	171
Figura 10 Predicción del modelo Random Forest.....	172
Figura 11 Importancia de las variables por SHAP Values	175
Figura 12 Distribución y magnitud de los coeficientes del Modelo Elastic Net	190
Figura 13 Impacto geográfico relativo en la Reducción: Top 10 países con efecto positivo y negativo (coeficientes β – Elastic Net)	193
Figura 14 Coeficientes de importancia en el modelo Elastic Net.....	195
Figura 15 Coeficientes por tipo de variable.....	199

Figura 16. Esparsidad del modelo Elastic Net con 78 de 232 variables seleccionadas.	158
Figura 17 Importancia total por categoría.....	206

Resumen

La investigación tiene como finalidad el diseño de un modelo de compensación ecológica orientado a mitigar los efectos del deterioro ambiental derivados de la gobernanza de proyectos. Si bien este ámbito ha transitado históricamente de una visión centrada en la eficiencia operativa a la incorporación progresiva de criterios de sostenibilidad, aún se evidencia una debilidad metodológica en la incorporación efectiva de la compensación ecológica en los principales estándares internacionales de gestión de proyectos, como PMBOK y PRINCE2. El marco teórico del estudio se fundamenta en la convergencia de tres enfoques complementarios: el pospositivista, que aborda los impactos ambientales como realidades objetivas susceptibles de medición a través de variables cuantificables, tales como las emisiones de gases de efecto invernadero o los créditos de carbono; el pragmático, que privilegia la generación de soluciones operativas mediante la integración de técnicas estadísticas avanzadas y criterios cualitativos asociados a tipologías y esquemas de certificación; y el enfoque biocéntrico-bioético, que incorpora una dimensión normativa al sostener que la compensación no debe limitarse a un cálculo económico, sino fundamentarse en principios de justicia ambiental y en la salvaguarda del valor intrínseco de la vida.

Este enfoque integrador contribuye al fortalecimiento de la teoría de la gobernanza de proyectos al ampliar su alcance hacia dimensiones ambientales, políticas y económicas. En el plano institucional, el modelo se articula con los compromisos internacionales asumidos en el marco del Acuerdo de París, favoreciendo esquemas de gobernanza ambiental más consistentes, mientras que, desde la perspectiva económica, incorpora criterios analíticos que optimizan la

toma de decisiones en inversión sostenible y la selección de créditos de carbono en el mercado voluntario. El principal aporte metodológico de la investigación se fundamenta en la contrastación sistemática entre modelos multivariados tradicionales y técnicas de aprendizaje estadístico, particularmente Elastic Net y Random Forest: el primero permite estabilizar los coeficientes y depurar los predictores relevantes, mientras que el segundo identifica relaciones no lineales y patrones complejos entre las variables. La integración de ambas aproximaciones da lugar a un modelo analíticamente más robusto, parsimonioso y replicable, con mayor capacidad explicativa para la gobernanza ambiental de proyectos.

La solidez del modelo se manifiesta en su capacidad para abordar de forma simultánea la multicolinealidad y la alta dimensionalidad de los datos mediante una penalización combinada L1/L2 propia del enfoque Elastic Net. Este procedimiento permitió una disminución significativa del error estándar residual, que pasó de 277.700 a 129.200, evidenciando una mejora sustancial en la estabilidad estadística del modelo y en la consistencia de sus estimaciones predictivas.

En términos de desempeño comparativo, el modelo alcanza un R^2 ajustado de 0,77 en datos de prueba, superando ampliamente al Random Forest ($R^2 \approx 0,49$), lo que demuestra una mayor capacidad explicativa y utilidad para la toma de decisiones gerenciales en compensación ecológica. La parsimonia se respalda empíricamente por la eliminación automática de aproximadamente del 66% a 78% de las 232 variables originales, reteniendo únicamente entre 50 y 78 predictores relevantes sin pérdida de poder predictivo. La validez del modelo se garantiza mediante un esquema de validación out-of-sample 70/15/15 aplicado a 3.897 registros del Berkeley Carbon Trading Project, donde los hiperparámetros (λ , α) se optimizan en validación y el desempeño final se evalúa exclusivamente en prueba, lo que asegura la ausencia de

sobreajuste, la reproducibilidad y la trazabilidad. Finalmente, el modelo genera una ecuación lineal interpretable, alineada con los principios bioéticos de transparencia y gobernanza ambiental.

El estudio se apoya en la base de datos del Berkeley Carbon Trading Project, lo que refuerza su rigor y su utilidad para fortalecer estrategias (ASG) ambiental, social y de gobernanza y responder a los retos urgentes del cambio climático.

Palabras clave: Sustentabilidad, modelo de compensación, deterioro ecológico, bioética.

1. Introducción

La expansión de los mercados voluntarios de carbono ha puesto en evidencia una carencia en la literatura especializada respecto a la disponibilidad de instrumentos analíticos capaces de articular la gestión de proyectos con la trazabilidad y el control del desempeño ambiental asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esta deficiencia limita la adecuada evaluación del riesgo, dificulta la identificación de variables estructurales relevantes y debilita la toma de decisiones gerenciales sustentadas en evidencia dentro de los procesos de gobernanza de proyectos. Frente a este vacío, la presente investigación propone y valida un modelo de compensación ecológica aplicado a la gerencia de proyectos, basado en el método de regularización Elastic Net, con el propósito de fortalecer la evaluación del desempeño ambiental, promover la transparencia y respaldar decisiones éticas y técnicamente informadas.

En esa dirección, este documento se ha estructurado en cinco capítulos; en el primero se desarrolla el marco teórico de esta investigación, que va más allá de una mera revisión conceptual, pues establece la justificación ontológica y epistemológica para construir un modelo que ayude a tomar decisiones. Este capítulo expone las motivaciones del estudio, destacando la carencia de métricas de mitigación en estándares como el PMBOK y la necesidad de una gobernanza bioéticamente responsable y se organiza en torno a una triple brecha identificada: la ausencia de un marco de compensación ecológica verificable dentro de los principales estándares de gobernanza de proyectos, como PMBOK y PRINCE2; la persistencia de un enfoque técnicamente reduccionista que omite el reconocimiento del valor intrínseco del capital natural; y la dispersión metodológica existente para el tratamiento de los impactos residuales y sus mecanismos de compensación.

La inexistencia de un esquema de compensación ecológica susceptible de verificación en los principales marcos de gobernanza de proyectos, entre ellos PMBOK y PRINCE2; la prevalencia de aproximaciones de carácter técnico-instrumental que no incorporan el valor intrínseco del capital natural; y la falta de coherencia metodológica en el abordaje sistemático de los impactos residuales y sus correspondientes mecanismos de compensación.

Desde una perspectiva metodológica, esta base conceptual demanda un enfoque de modelado predictivo que permita superar tanto la inestabilidad propia de la regresión lineal convencional como las restricciones de interpretabilidad presentes en los modelos de bosques aleatorios. Esta necesidad fundamenta la elección del modelo Elastic Net, cuya doble penalización posibilita integrar de forma simultánea la selección de variables significativas y la estabilidad requerida para una predicción robusta. Finalmente, el capítulo dos incorpora el Compromiso Bioético como eje transversal, estableciendo que la compensación no debe reducirse a un cálculo meramente cuantitativo, sino orientarse hacia la priorización de la calidad y los cobeneficios generados, transformando el pilar ambiental de la Triple Línea Base en una exigencia obligatoria dentro de la gestión de proyectos.

El capítulo tres adopta un enfoque pospositivista y de aprendizaje supervisado. La característica central de este apartado es la rigurosidad en el procesamiento de 3.897 registros del *Berkeley Carbon Trading Project*, en el que se aplican técnicas de regularización estadística para gestionar la alta dimensionalidad de los mercados globales. Es importante precisar que el alcance de este instrumento se centra en la valoración técnica y predictiva para la toma de decisiones gerenciales, con la limitación de no pretender sustituir evaluaciones biológicas *in situ*, sino mitigar la incertidumbre en la fase de planeación. La metodología se sustenta en el Paradigma Pragmático y adopta un enfoque cuantitativo, aplicado y no experimental, de alcance correlacional-

predictivo, anclado en un diseño ex post facto. La Regresión Elastic Net se establece como la técnica de modelado principal tras un proceso comparativo, al demostrar su capacidad para abordar de forma simultánea dos desafíos metodológicos clave: por un lado, la penalización L1, propia del enfoque Lasso, favorece la parsimonia del modelo mediante la reducción de la dimensionalidad, pasando de 233 a 50 variables activas, y, por otro, la penalización L2, asociada al método Ridge, aporta estabilidad predictiva al mitigar los efectos de la multicolinealidad entre los predictores. La validez se prueba mediante el protocolo fuera de muestra (Out-of-Sample) en el software R, cuyo rigor algorítmico legitima la aplicabilidad del modelo como un Decision Support System (DSS) para la gobernanza de proyectos.

El penúltimo capítulo presenta la evidencia empírica obtenida a partir de la ejecución de los modelos. Se comparan las métricas de rendimiento en el conjunto de prueba, lo que demuestra la superioridad del Elastic Net frente a los modelos de *benchmark*. Se detalla cómo el mecanismo L1 logró reducir la dimensionalidad al eliminar $\approx 78\%$ de los coeficientes, lo que confirma la parsimonia del modelo. El análisis se centra en la magnitud de los coeficientes estandarizados retenidos, verificando que los factores de trazabilidad (Créditos Retirados) y de calidad tecnológica (HFC23 Destruction) presentan los pesos más altos, lo que constituye prueba directa para la aceptación categórica de la hipótesis alterna 3.

El capítulo cuatro sintetiza las aportaciones singulares de la tesis a la disciplina. Los resultados resaltan la superioridad del modelo Elastic Net, que alcanzó un R cuadrado ajustado de 0,77. Este resultado no es general, sino concreto: demuestra que la reducción de 232 variables a una estructura más parsimoniosa permite una gobernanza más eficiente y transparente. La fortaleza del modelo se refleja en su capacidad para abordar conjuntamente la multicolinealidad y la alta dimensionalidad del conjunto de datos mediante un esquema de regularización L1/L2,

característico del método Elastic Net. Como resultado de este ajuste, el error estándar residual se redujo notablemente, pasando de 277.700 a 129.200, lo que evidencia una mayor estabilidad estadística y una mejora consistente en la capacidad predictiva del modelo.

1 Capítulo 1. Propósito y organización

1.1 Planteamiento del problema

El propósito de esta investigación es construir un modelo de compensación ecológica en la gobernanza de proyectos, con el fin de proporcionar al gerente de proyectos información para compensar los elementos ecosistémicos impactados como agregado de valor en la entrega del proyecto y en su seguimiento posterior. La fundamentación del modelo se basará en la disponibilidad de información sobre las metodologías de gerencia de proyectos más empleadas y en su componente de sostenibilidad. El objeto de estudio de esta investigación se centra en la ineficacia de los estándares actuales de gobernanza de proyectos para integrar la compensación ecológica como métrica operativa auditable. A pesar de la existencia de marcos globales, se detecta un vacío en la definición de relaciones funcionales que permitan determinar la alícuota de compensación necesaria frente a la huella organizacional.

Uno de los vacíos más relevantes de los modelos existentes radica en la escasa consideración de la dimensión geográfica como elemento clave para la efectividad. La problemática central se define por la interacción de un conjunto de variables clave que, hasta el momento, han sido abordadas de manera fragmentada en la gestión de proyectos. La investigación delimita como variable dependiente la cuantía de la compensación ecológica requerida, expresada en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). Como **variables** independientes, asociadas a los factores de gobernanza, se consideran el tipo de estándar de registro (VCS, Gold Standard, ACR, CAR), la metodología de mitigación implementada tales como REDD+, energías renovables o gestión de tierras y el volumen histórico de créditos emitidos. Adicionalmente, se incorporan variables moderadoras del contexto geográfico,

representadas por la localización jurisdiccional del proyecto y por las características del ecosistema intervenido. Los mecanismos de compensación. La diversidad de ecosistemas, junto con las diferencias en los marcos regulatorios locales, produce resultados de mitigación heterogéneos que no pueden abordarse de manera uniforme. En el ámbito de la gobernanza de proyectos, la omisión de la localización territorial limita la precisión de la valoración técnica, dado que tanto el costo como la eficiencia de una tonelada de CO₂ equivalente presentan variaciones significativas entre regiones, lo que incrementa la incertidumbre en los procesos de decisión estratégica y financiera.

El alcance de esta investigación se define a partir de una problemática que afecta a organizaciones con operaciones internacionales y a profesionales de la gerencia de proyectos que aplican marcos de referencia como PMBOK y PRINCE2, quienes enfrentan un riesgo elevado de incurrir en prácticas de *greenwashing* debido a la ausencia de herramientas predictivas robustas y verificables para la compensación ecológica. En este marco, el estudio se delimita temporalmente al análisis de la base de datos histórica del Berkeley Carbon Trading Project hasta el año 2025 y adopta un alcance geográfico global, lo que permite capturar la diversidad estructural, institucional y operativa de los mercados voluntarios de carbono, así como evaluar la aplicabilidad del modelo propuesto en distintos contextos internacionales de gobernanza de proyectos.

El contexto contemporáneo de transición hacia esquemas de producción y gestión de proyectos más sostenibles exige la adopción inmediata de estrategias de mitigación ecológica orientadas a compensar los impactos de las distintas actividades sobre los ecosistemas. Esta exigencia se vuelve más urgente, según Wende (2018), en sectores con una preocupante huella

ecológica, en los que la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el uso de mecanismos de compensación constituyen componentes esenciales de una gobernanza de proyectos éticamente responsable. Sin embargo, como señala Gabbatiss (2023), pese a la expansión del mercado voluntario de carbono y a los avances en estándares internacionales vigentes como Verra, Gold Standard o la norma ISO 14064, estos desarrollos no subsanan la ausencia de un modelo técnico-metodológico integrado que permita articular de manera cuantitativa y operativa las principales variables ambientales con criterios de sostenibilidad, trazabilidad y factibilidad operativa.

De acuerdo con Gabbatiss (2023), es pertinente destacar que un número considerable de proyectos no ha logrado generar resultados ambientalmente significativos. Desde una postura crítica, diversos defensores de la causa sostienen que el comercio de carbono, pese a su continua expansión, no solo opera como un instrumento económico, sino que también constituye un obstáculo para la consecución de reducciones reales de emisiones, al otorgar a los mayores emisores una cuestionable “licencia para contaminar”. Esta situación pone de manifiesto la necesidad urgente de revisar los enfoques actualmente adoptados y explorar alternativas más eficaces para enfrentar de manera estructural la crisis ambiental.

Los investigadores, según Gabbatiss (2023), han manifestado su inquietud respecto a que las compensaciones constituyen una solución económica para la acción climática, pero, a su vez, generan disminuciones poco significativas en las emisiones.

No obstante, se emplea información relacionada con proyectos de compensación ecológica desarrollados mundialmente dada su evolución y relevancia para la compensación de CO₂ dióxido de carbono generado con la ejecución de múltiples proyectos debido a que es el gas efecto invernadero más abundante generado por la actividad humana de acuerdo con (Espíndola

& Valderrama, 2012) y aunque es imposible su eliminación total, su compensación permite equilibrar las emisiones que permitan mantener el calentamiento global dentro de los límites establecidos respondiendo con las exigencias de consumidores y representando un instrumento estratégico en la gobernanza de proyectos teniendo en cuenta que todo proyecto produce una huella de carbono.

Durante varias décadas, los investigadores han evidenciado que tanto los profesionales como los académicos suelen tener una percepción simplista de lo que es el éxito de un proyecto, que se demuestra a partir de definiciones contradictorias y erróneas sobre un fenómeno difícil de estimar, como son las valoraciones realizadas por las partes interesadas en las que se exhibe diferencias entre grupos y coaliciones que pocas veces son coincidentes, en ese sentido, un proyecto puede cumplir con su objetivo y satisfacción de demandada las partes interesadas, pero sus efectos sobre el medio ambiente y la sociedad, son cuestionables. Garantizar la sostenibilidad continúa siendo uno de los retos centrales de esta disciplina y, como respuesta a esta exigencia, resulta necesario avanzar hacia un modelo de consenso simplificado que permita articular de manera equilibrada los intereses de los actores involucrados, de la sociedad y del entorno natural (Ika & Pinto, 2022).

Los ecosistemas atraviesan un proceso acelerado de degradación y se ven sometidos a presiones crecientes derivadas de prácticas humanas insostenibles. En este contexto, la restauración de los impactos ocasionados al entorno natural y la protección de la biodiversidad mediante mecanismos de compensación ecológica se consolidan como acciones indispensables para avanzar hacia un modelo de desarrollo verdaderamente sostenible (Wang et al., 2022). En este contexto, el modelo de compensación ecológica en la gobernanza de proyectos puede ser implementado por los gerentes de proyectos que aplican metodologías en su ejecución, con el

propósito de disminuir la huella de carbono generada por el proyecto, consecuencia del uso de componentes bióticos y abióticos que resultan necesarios emplear, al mismo tiempo que se busca compensar.

La alícuota al detrimento ecológico causado por la ejecución de proyectos consultados en literatura científica en base de datos de Scopus 2023, evidencia que algunos de los modelos de compensación existentes tienen eficacia en casos específicos debido a que su diseño se centra en características específicas a estudio de casos y la compensación ecológica es enmarcada dentro de un modelo financiero, es decir, se vincula el deterioro ecológico con el riesgo financiero y su enfoque carece entonces de una compensación que permita resarcir los ciclos vitales de los ecosistemas afectados.

Con referencia a las metodologías empleadas en la gestión de proyectos, Barajas (2017) sostiene que los estándares de la gestión de proyectos y las guías sobre los fundamentos de la gestión de proyectos no han sufrido actualización alguna para incorporar los elementos de la sostenibilidad ni para migrar de la triple restricción alcance – tiempo – costo al concepto de triple resultado (Triple Bottom Line – TBL) propuesto por Elkington (1997), citado por Barajas (2017).

Por ejemplo las guías estándar sobre la dirección de proyectos, el PMBOK (Project Management Institute, 2017), hace referencia a factores ambientales de la empresa internos o externos que influyen en los diferentes procesos de dirección y gestión del trabajo del proyecto, y que rodean o influyen en su éxito incluyendo la cultura de la organización, compañía o cliente y estructura de las organizaciones ejecutoras o patrocinadoras del proyecto, infraestructuras existentes, tolerancia al riesgo de los interesados, sistemas de información para la dirección de

proyectos (recopilación y distribución de información, programación, sin embargo, no identifica los intereses sociales o medioambientales como dimensiones de influencia (González, 2018).

En el PRINCE2 no se especifican los beneficios potenciales que podría tener, en el proyecto, la adopción de los principios de sostenibilidad en los ámbitos social y medioambiental; solo se hace una mención general (González, 2018).

La sostenibilidad se menciona tres veces en la Guía PMBOK como un factor contextual que el director del proyecto debe tener en cuenta, ya que las políticas y regulaciones de sostenibilidad pueden influir en el proyecto. Las consideraciones de sostenibilidad se consideran externas al proyecto básico, pero es posible que deban incluirse, ya que el éxito del proyecto se evaluará conforme a las políticas de la organización. PRINCE2, la Guía PMbok 18 y la Línea de Base de Competencia Internacional sobre las cuestiones de las partes interesadas y la sostenibilidad. Se concluye que ninguno de los tres considera explícitamente cuestiones de sostenibilidad (Økland, 2015).

Desde esta perspectiva, se enumeran cuatro de las múltiples y variadas causas responsables del detrimento ecológico que justifican el desarrollo de un modelo de compensación, su trazabilidad y la operabilidad de su diseño, así como la delimitación de su alcance y la identificación de las variables asociadas a la problemática. La primera es la huella organizacional que los proyectos pueden generar al medio ambiente durante y después de su ejecución, la segunda el componente regulatorio en la ejecución de proyectos que materializan el establecimiento de políticas públicas de protección ecológica a partir de la concepción de compensación, la tercera se refiere al componente de sostenibilidad en las principales metodologías de gestión de proyectos y sus esquemas de compensación y finalmente, la

evaluación ex post del componente de sostenibilidad en la ejecución de proyectos como se describen a continuación en los siguientes antecedentes:

1.1.1 La huella organizacional y de carbono en la gestión de proyectos:

En la actualidad, el problema de la contaminación y los daños causados al medio ambiente trascienden las fronteras de cada nación; el impacto de la actividad humana en el entorno natural ha sido notorio, ocasionando deterioros y disminuyendo el valor general del entorno circundante. (Gogolova et al., 2023). A pesar de que la globalización económica y el consumo de recursos siguen promoviendo el crecimiento entre los países, la Convención de París, adoptada en la COP21, ha resaltado algunos peligros ambientales inminentes que enfrenta la humanidad si se desatienden las acciones climáticas colectivas necesarias. En este contexto, resulta esencial dirigirse a los tomadores de decisiones, a los legisladores empresariales, a los operadores de mantenimiento y a los inspectores, y enfatizar la relevancia de estos aspectos en materia de sostenibilidad (Eisinger et al., 2022).

El deterioro de las condiciones ecológicas a nivel global se debe, en gran parte, a las acciones humanas de carácter antropogénico, motivadas por la imperiosa necesidad de obtener resultados económicos. Esta situación ha provocado una creciente acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, que impactan negativamente en las condiciones climáticas y contribuyen a la ocurrencia de desastres naturales y a los cambios climáticos que afectan al planeta en su totalidad (Domrachev, 2022).

Existen numerosos factores que afectan negativamente a los ecosistemas durante el proceso de producción. Entre ellas, destacan las actividades de las organizaciones, tanto en la industria social como en la agricultura, que requieren recursos hídricos. Esta situación puede acarrear escasez de agua en la cuenca, así como el deterioro del entorno acuático y la

contaminación de los recursos hídricos (Lu et al., 2020). Las opciones planteadas en respuesta a esta problemática están vinculadas al pago por servicios ecosistémicos, un componente fundamental para abordar las contradicciones entre la conservación ecológica y el crecimiento económico; no obstante, la efectividad de estos pagos es relativamente baja (Wang et al., 2022).

Son múltiples las variables que pueden afectar la economía y el planeta. Por ello, varias investigaciones sugieren una diatriba entre el desarrollo económico y la salvaguardia de los ecosistemas que incluyen a las personas y los sistemas ecológicos; en ese orden de ideas, se han implementado acciones de resiliencia debido al impacto negativo en la biodiversidad a escala planetaria (Yu et al., 2016).

Sumado a esto, los métodos tradicionales que se utilizan para determinar las normas de compensación ecológica en diferentes tipos de tierras generalmente descuidan el ecosistema en su conjunto y no son tan aplicables en la práctica porque las normas que establecen son a menudo demasiado estrictas para la compensación (Zheng et al., 2013)

La huella de carbono

La huella de carbono es un término relativamente nuevo; Høgevold (2003), citado por Ferreira & Tarazona (2017) fue la primera persona en emplearlo. Esta expresión es una derivación de la definición de huella ecológica propuesta por Wackernagel y Rees, que el propio autor cita. Para ellos, la huella de carbono (HC) es promovida principalmente por entidades gubernamentales y no gubernamentales, y por entidades de carácter privado, y no por la misma comunidad científica. Estos usuarios del término han empleado diversas definiciones y formas de comprenderlo. Sin embargo, todas estas definiciones tienen un rasgo común: la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, fundamentales para el cambio climático, generadas

por actividades antropogénicas relacionadas con la producción y el consumo. En general, se incluyen las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI), las cuales son expresadas en CO₂eq.

En ese orden de ideas, la problemática relacionada con el deterioro de los sistemas ecológicos trasciende el escenario local; el impacto que ha ocasionado la actividad humana sobre el entorno es cada vez mayor (Gogolova et al., 2023). Pese a la globalización económica y a los convenios en torno a la protección de los ecosistemas, la explotación de recursos sigue siendo una de las principales fuentes de riqueza para las naciones. La Convención de París, adoptada en la COP21, puso sobre la mesa algunos de los riesgos ambientales inminentes y sus consecuencias para la humanidad si no se priorizan las acciones climáticas colectivas necesarias. En este contexto, es fundamental llamar la atención de los responsables de la toma de decisiones, de los legisladores, de los operadores de mantenimiento e inspectores sobre estos aspectos de sostenibilidad (Eisinger et al., 2022).

La degradación de la situación ecológica a nivel global es, en gran medida, el resultado de la actividad humana antropogénica, impulsada por la necesidad de obtener beneficios económicos. Esta realidad ha conducido a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que afecta negativamente las condiciones climáticas y propicia desastres naturales, así como el cambio climático a escala planetaria (Domrachev, 2022).

Existen numerosos factores que perjudican a los ecosistemas durante el proceso productivo; entre ellos se destacan las emisiones de dióxido de carbono derivadas de cambios en el uso de la tierra. Esto pone de manifiesto el grado de alteración del medio ambiente causado por dichas actividades humanas (Xu et al., 2019). No obstante, los procesos productivos son responsabilidad de las organizaciones de la industria social y de la agricultura. La creciente

demanda de recursos hídricos puede dar lugar a la escasez de agua en las cuencas, así como al deterioro del medio ambiente hídrico y a la contaminación de los recursos (Lu et al., 2020). Las alternativas propuestas ante esta problemática están vinculadas al concepto de pago por servicios ecosistémicos, que constituyen un elemento clave para abordar las contradicciones entre la protección ecológica y el desarrollo económico; sin embargo, se ha observado que dichos pagos presentan una eficiencia relativamente baja (Wang et al., 2022).

Ante la identificación de variables que afectan de manera directa la economía y plantean un antagonismo entre desarrollo económico y protección de los ecosistemas que incluyen la población y todo componente de la biodiversidad, se han implementado acciones de recuperación por su impacto en la biodiversidad a nivel mundial. Sin embargo, persisten preguntas importantes sobre las compensaciones por la biodiversidad ante dichas modificaciones antropogénicas (Yu et al., 2017).

Además, los enfoques tradicionales empleados para definir las directrices de compensación ecológica en diversos tipos de terrenos a menudo ignoran el ecosistema en su conjunto y resultan menos prácticos, ya que las regulaciones que generan suelen ser excesivamente rígidas para la compensación (Zheng et al., 2013).

En síntesis, la actual crisis ambiental, evidenciada por el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la degradación de nuestros ecosistemas y la creciente presión sobre los recursos naturales, constituye una clara manifestación de los efectos acumulativos de las actividades productivas en la sociedad. Aunque se han logrado ciertos avances normativos y una mayor conciencia gracias a acuerdos internacionales como la Convención de París, se enfrentan retos significativos para alinear el crecimiento económico con la sostenibilidad

ecológica. Esto es especialmente evidente en sectores que generan una alta huella de carbono y dependen intensamente de los recursos. La limitada efectividad de los mecanismos tradicionales de compensación ambiental y la fragmentación en el cálculo de la huella ecológica y de carbono resaltan la urgente necesidad de desarrollar modelos integrales de compensación ecológica, técnicamente viables y aplicables a la gobernanza de proyectos.

1.1.2 La regulación referida a la compensación ecológica en la ejecución de proyectos

Las externalidades del reasentamiento sobre el medio ambiente rara vez se consideran en las políticas o regulaciones de compensación vigentes y, por lo tanto, surgen numerosos problemas ambientales tanto para los seres humanos como para el medio ambiente (Yu et al., 2016).

Una de las soluciones desde el ámbito legislativo suele ser la imposición de tributos ambientales para reducir la contaminación. No obstante, su eficacia para reducir la contaminación sigue siendo un tema de debate. Además, implementar impuestos sobre el uso de recursos puede ser efectivo, pero conlleva efectos ambientales; por ello, se recomienda que los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) implementen impuestos ambientales específicos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Al Shammre et al., 2023)

Un caso que se puede citar en esta misma línea de modelos de compensación desarrollados es la correspondencia entre proyectos de consumo, tipos de suelo y funciones ecológicas, y la contabilización del valor económico del déficit ecológico nacional, entendido

como la suma de los déficits regionales. Con base en esto, el déficit ecológico se utiliza como un factor de insumo no remunerado en la construcción de una Matriz de Contabilidad Social verde, y se emplea un modelo dinámico recursivo de Equilibrio General Computable para analizar los efectos de una política tributaria sobre la compensación del déficit ecológico (Xiong & Li, 2019).

En este sentido, una de las críticas más recurrentes contra los mecanismos de compensación ambiental es que suelen sustituir pérdidas inmediatas y tangibles por beneficios futuros cuya materialización resulta incierta. En el caso particular de las compensaciones asociadas a procesos de restauración ecológica, los resultados positivos pueden tardar décadas en manifestarse y presentan un alto grado de incertidumbre (Laitila et al., 2014). Actualmente, la biodiversidad enfrenta una disminución acelerada, mientras que las políticas vigentes tienden a centrarse en la protección de especies y hábitats de alto valor ecológico, dejando de lado aquellos considerados menos relevantes, donde la degradación continúa avanzando. Una alternativa frente a esta problemática consiste en compensar las pérdidas de biodiversidad derivadas de los proyectos de desarrollo. La premisa fundamental de este enfoque es sencilla: el promotor de una intervención debe generar mejoras equivalentes o superiores en biodiversidad que compensen el valor ecológico afectado (Kangas & Ollikainen, 2019).

Por ejemplo, las políticas de desarrollo han generado impactos significativos en los humedales costeros, al fomentar o permitir la expansión descontrolada de actividades urbanas y económicas. Esta situación refleja una falta de coherencia entre la planificación territorial y las dinámicas ecológicas, a menudo condicionada por intereses económicos. Ante ello, resulta fundamental que los gobiernos promuevan procesos de adaptación que integren sistemas de gobernanza colaborativos, descentralizados y de múltiples niveles, que incluyan de manera efectiva la participación de las comunidades locales en la toma de decisiones. Este tipo de

gobernanza adaptativa fortalece las acciones de conservación, restauración, mitigación y compensación, aspectos esenciales frente a los impactos adversos del cambio climático (Mojica Vélez et al., 2018).

Desde esa perspectiva se espera que los formuladores de políticas sobre índices de compensación mínimos realistas o requisitos de área de compensación, tengan en cuenta el tiempo de demora de la compensación, el valor de los escenarios contrafactuales, la correlación entre el tamaño del efecto sobre la biodiversidad y la recuperación, el riesgo de fracaso en la restauración y la cantidad bruta de restauración. Estos resultados tienen implicaciones importantes para la restauración ecológica y la compensación (Yu et al., 2017).

En conclusión, la creciente presión ambiental generada por proyectos de desarrollo y procesos productivos no ha sido debidamente contrarrestada por mecanismos de compensación eficaces, lo que genera un vacío crítico en la protección de los ecosistemas y del bienestar humano. Las externalidades negativas derivadas de estos procesos, como el reasentamiento poblacional o la transformación territorial, continúan excluidas de las regulaciones ambientales vigentes, lo que agrava la pérdida de biodiversidad, la fragmentación de hábitats y el deterioro funcional de los servicios ecosistémicos.

Si bien se han explorado instrumentos como los tributos ambientales o los modelos de compensación basados en déficits ecológicos, persiste una brecha significativa entre el diseño normativo y la realidad ecológica, marcada por compensaciones inciertas, diferidas en el tiempo y a menudo ineficaces. Frente a ello, resulta impostergable la construcción de un modelo de compensación ecológica que reconozca las limitaciones actuales, incorpore criterios técnicos realistas como el tiempo de recuperación, el riesgo de restauración fallida y los valores

contrafactuales y contribuya a transformar la gobernanza de los proyectos hacia una lógica que priorice la sostenibilidad, la equidad ambiental y la resiliencia ecológica.

1.1.3 Sostenibilidad en las principales metodologías y estándares empleados en la gobernanza de proyectos.

La contaminación ambiental derivada de los procesos químicos y de otras actividades industriales que utilizan compuestos desarrollados desde la Revolución Industrial ha alcanzado dimensiones considerables, generando una creciente preocupación y movilización entre los distintos actores involucrados. Esta situación ha impulsado la creación de un conjunto de normas ISO orientadas a abordar los desafíos ambientales. Dichas regulaciones surgieron tras la identificación y difusión de diversos problemas ecológicos que afectan la calidad de vida y han elevado la conciencia ambiental a nivel internacional (Kiran, 2017)

Sin embargo, los cambios que se están produciendo en la sensibilidad ambiental obligan a las organizaciones a adoptar un nuevo enfoque ante este problema. Esto ha llevado a organizaciones como la Organización Internacional de Normalización (ISO) a desarrollar normas que ayuden a todo tipo de organizaciones a lograr un desarrollo sostenible, como la familia de normas ISO 14000. Sin embargo, la familia de normas ISO 14000 es demasiado genérica y no aborda áreas específicas de gran relevancia para las organizaciones (Patón et al., 2019)

La literatura académica ha abordado ampliamente la sostenibilidad y las distintas formas de incorporar sus principios en la gestión de proyectos. Sin embargo, persiste una brecha significativa entre las recomendaciones teóricas y su aplicación en la práctica profesional. Diversos autores señalan que la implementación de dichas propuestas implicaría un cambio profundo en los paradigmas tradicionales de la gestión de proyectos. Dado que esta

transformación aún no se ha consolidado, se sugiere continuar investigando sobre los modelos mentales vinculados al desarrollo de proyectos y a la sostenibilidad, con el fin de lograr una integración más efectiva de estos principios en la práctica gerencial (Økland, 2015).

El *Project Management Body of Knowledge* (PMBOK), desarrollado por el *Project Management Institute* (PMI), se ha consolidado como una de las metodologías de gestión de proyectos más reconocidas y empleadas a nivel mundial. Esta guía organiza cuarenta y siete procesos distribuidos en cinco grupos inicio, planificación, ejecución, monitoreo y control, y cierre que, a su vez, se articulan con distintas áreas del conocimiento, tales como integración, alcance, cronograma, costos, calidad, recursos humanos, comunicaciones, riesgos, adquisiciones y gestión de los interesados. Sin embargo, aunque el concepto de sostenibilidad aparece mencionado dentro del marco metodológico, no se incorpora como un eje estructural ni se considera desde el enfoque de la compensación ambiental (Ruiz & Gaviria, 2017) ni desde la perspectiva de la compensación.

La metodología PRINCE2 garantiza un enfoque en la viabilidad del proyecto de cara a los objetivos del caso de negocio, y la definición y entrega del producto del proyecto, haciendo énfasis en sus requerimientos de calidad y al igual que la metodología descrita en el PMBOK del PMI, PRINCE2 refiere al concepto de sostenibilidad en algunos apartados, pero no lo incluye como parte de su metodología (Ruiz & Gaviria, 2017) y no aborda procesos de compensación ecológica.

Un estándar orientado a la sostenibilidad para la gestión de proyectos es el *Projects Integrating Sustainability Methods Prism*. (PRiSM) se basa en los procesos de gestión de proyectos ISO 21500 y considera la sostenibilidad en sus procesos. Incorporar un análisis del impacto en sostenibilidad desde la fase inicial del proyecto, así como en los procesos de

ejecución y control, representa una oportunidad valiosa para integrar de manera efectiva los principios de sostenibilidad dentro del ciclo de vida del proyecto (Silvius, 2019). Sin embargo, no propone, de manera específica, en su metodología procesos de compensación ecológica. El creciente interés por el desempeño ambiental, social y de gobernanza (ESG) se ha convertido en uno de los principales retos que enfrentan actualmente las organizaciones.

Este enfoque surge como una evolución de los reportes de Responsabilidad Social Corporativa (RSC), aportando mayor solidez metodológica y coherencia al proceso de divulgación. Para apoyar la mejora continua y la transparencia en los informes ESG, se han desarrollado diversos marcos de referencia, entre los que destacan la Iniciativa de Reporte Global (GRI), la Junta de Normas de Contabilidad de Sostenibilidad (SASB), el Grupo de Trabajo sobre Divulgaciones Financieras Relacionadas con el Clima (TCFD) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS). Todos ellos, aunque con alcances distintos, comparten la meta común de fortalecer el desempeño organizacional en uno o varios pilares del enfoque ESG.

Esta mejora no pretende ser aguda, sino más bien demostrar una mejora organizacional continua a lo largo del tiempo. Para cumplir eficazmente los requisitos ESG, las empresas tendrán que demostrar mejoras sostenidas en los pilares ESG definidos, respaldadas por: estrategias ESG definidas; procesos establecidos y prácticas consistentes y progresivas; medición, presentación de informes y supervisión del liderazgo; y divulgación (Jean & Grant, 2022). Se puede visualizar, entonces, que, dentro de su objetivo común, no se alude a la protección ecológica de los sistemas ni a su compensación.

En síntesis, la crisis ambiental contemporánea evidencia profundas deficiencias en la forma en que se conciben y gestionan los proyectos, así como en los marcos normativos y

modelos empresariales tradicionales frente a los desafíos que impone la sostenibilidad del entorno. A pesar de la existencia de lineamientos y estándares internacionales, como las normas ISO 14000 y las metodologías PMBOK, PRINCE2 y PRiSM, su abordaje de la sostenibilidad resulta general y carece de estrategias concretas orientadas a compensar los impactos ambientales generados a lo largo del ciclo de vida de los proyectos. Esta carencia se acentúa en un contexto marcado por elevados niveles de contaminación industrial, una débil implementación de políticas ambientales y una persistente desconexión entre el discurso académico sobre sostenibilidad y su aplicación efectiva en la práctica profesional.

Por otro lado, aunque los marcos de reporte ESG presentan una estructura sólida y un nivel considerable de formalidad, no abordan con precisión las acciones restaurativas ni establecen mecanismos efectivos de compensación frente al daño ambiental ocasionado por las actividades productivas. Esta limitación pone de relieve la necesidad apremiante de desarrollar un modelo de compensación ecológica que se articule, dentro de la gobernanza de proyectos, como componente técnico, ético y operativo. Un modelo de este tipo permitiría no solo mitigar los impactos ambientales, sino también reorientar la planificación organizacional hacia una sostenibilidad auténtica, cuantificable y de cumplimiento obligatorio.

1.1.4 La compensación ecológica presente en los estándares y metodologías empleados en la gobernanza de proyectos:

La compensación ecológica se ha reconocido como una herramienta fundamental para detener la pérdida de biodiversidad y preservar los valores naturales. No obstante, la evidencia sobre su aplicación práctica aún es limitada, y persisten grandes incertidumbres respecto a su diseño e implementación para que funcione de manera efectiva como instrumento de

conservación. Este enfoque continúa en una etapa temprana de desarrollo y enfrenta múltiples desafíos operativos, tanto en el ámbito legal como en las dinámicas de los procesos de planificación. Además, la ausencia de una visión integral y de una perspectiva a gran escala, junto con la concentración en un número reducido de especies específicas, puede generar efectos contraproducentes para la conservación de la biodiversidad en su conjunto (Blicharska et al., 2022).

El concepto de compensación ecológica ha adquirido relevancia global como respuesta al desequilibrio existente entre el desarrollo social, económico y ambiental, así como a la creciente presión ejercida sobre la capacidad de carga de los ecosistemas. No obstante, los enfoques empleados para determinar los criterios y estándares de compensación ecológica difieren significativamente entre contextos y metodologías. En consecuencia, resulta esencial comprender el proceso mediante el cual se define un umbral adecuado que permita establecer compensaciones ecológicas proporcionales y efectivas (Zhang et al., 2022).

El análisis de compensación puede utilizarse para calcular los cambios en los ecosistemas asociados a aspectos concretos de una empresa (como un proyecto específico o un vertido de petróleo) o para comparar los resultados de diferentes alternativas (por ejemplo, en los análisis de inversión de capital). La VCE se utiliza para calcular y comparar las compensaciones de distintos impactos (Cole et al., 2021).

La problemática anteriormente expuesta desde una perspectiva general justifica el diseño de un modelo para la valoración de la compensación ecológica en la gobernanza de proyectos, debido a que, como se ha evidenciado, este tema ha sido abordado de manera superficial por las metodologías de gerencia de proyectos comúnmente empleadas. El *Project Management Institute* (PMI) conceptualiza los proyectos como esfuerzos temporales orientados a generar un

producto, un servicio o un resultado único. Desde esta perspectiva, los proyectos pueden entenderse como instrumentos de transformación positiva, pues constituyen una de las formas más eficaces de estructurar y gestionar respuestas organizadas frente a una necesidad o problema específico. Los proyectos consisten en crear algo que no existía antes de su ejecución. Teniendo en cuenta que un tercio del PIB (producto interno bruto) mundial depende de la ejecución de proyectos, el impacto potencial de integrar adecuadamente las consideraciones de sostenibilidad en la gestión de proyectos trasciende la consideración utópica (Økland, 2015).

La sostenibilidad se menciona en la Guía PMbok, PRINCE2 y la Línea de Base de Competencia Internacional ICB, como un factor contextual que el director del proyecto debe considerar, por políticas y regulaciones de sostenibilidad pueden influir en el proyecto y el tema se considera como una externalidad al proyecto básico, siendo importante incluirlo debido a que el éxito del proyecto se evaluará de acuerdo con las políticas de la organización. Se concluye que ninguno de los tres considera explícitamente cuestiones de sostenibilidad (Økland, 2015).

El modelo de valoración de la compensación ecológica se desarrolla en el marco general de la sostenibilidad. Sin embargo, su aplicación se circunscribe específicamente a la dimensión ambiental, ya que propone un método orientado a medir la compensación asociada al deterioro ecológico, sin abarcar de manera directa las dimensiones sociales y económicas de la sostenibilidad.

En síntesis, la creciente presión ejercida sobre los ecosistemas como consecuencia de actividades humanas entre ellas, la expansión industrial, el desarrollo urbano desordenado, la sobreexplotación de los recursos naturales y la ejecución de proyectos carentes de criterios de sostenibilidad ha generado un marcado desequilibrio ecológico con impactos cada vez más evidentes. Entre las causas estructurales de esta problemática se destacan la escasa incorporación

de variables ambientales en los procesos de planificación de proyectos, la ausencia de mecanismos uniformes de compensación ecológica, así como la fragmentación de las políticas públicas y la débil articulación entre los marcos técnicos de gestión de proyectos y los principios de sostenibilidad.

Esta situación ha provocado una pérdida progresiva de biodiversidad, el deterioro de los servicios ecosistémicos y una disminución en la capacidad de regeneración de los entornos naturales. Además, persiste una desconexión entre los principios ambientales formulados en las normas internacionales y su aplicación práctica a lo largo del ciclo de vida de los proyectos, lo que genera impactos negativos que no son adecuadamente mitigados ni compensados. Aunque se han introducido mejoras normativas y se han desarrollado nuevos instrumentos para evaluar la sostenibilidad, aún no existe un modelo técnico-operativo que permita contabilizar, equiparar y valorar de forma estandarizada y objetiva la compensación ecológica dentro de los sistemas de gobernanza de proyectos.

Esta ausencia profundiza la crisis ambiental, debilita la legitimidad de las acciones de mitigación y compromete el cumplimiento de los objetivos ambientales globales.

Ante la limitada capacidad de los modelos actuales para valorar de manera precisa y parsimoniosa la mitigación de impactos ambientales en grandes proyectos, surge la necesidad de validar instrumentos predictivos que optimicen la alícuota de compensación. Bajo este escenario, se plantea el siguiente problema de investigación:

¿De qué manera un modelo predictivo basado en métricas de CO₂ equivalente contribuye a la estructuración de una gobernanza de proyectos que asegure la valoración técnica y la sostenibilidad de la compensación ecológica?

1.2 Propósito de la investigación

El propósito de esta investigación es analizar y estructurar un marco técnico de referencia que permita integrar la compensación ecológica, expresada en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), en los procesos de gobernanza y gerencia de proyectos, frente a las limitaciones actuales en la medición del riesgo ambiental, la trazabilidad del desempeño y la asignación eficiente de recursos. Este propósito responde a la necesidad de superar el tratamiento fragmentado de la sostenibilidad en los estándares de gestión de proyectos, mediante un enfoque cuantitativo que contribuya a reducir la incertidumbre en la toma de decisiones, fortalezca la transparencia y respalde criterios verificables de responsabilidad ambiental a lo largo del ciclo de vida del proyecto, en coherencia con los compromisos climáticos globales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de compensación ecológica para la gobernanza de proyectos, basado en la estimación de métricas de CO₂ equivalente, que permita valorar la mitigación de impactos ambientales y fortalecer la toma de decisiones con criterios de sostenibilidad.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar los modelos de compensación ecológica desarrollados en las metodologías y estándares utilizados en gerencia de proyectos
- Determinar los componentes necesarios para la construcción de un modelo de compensación ecológica, incluyendo las variables, sus métricas y las técnicas de modelado para su desarrollo.
- Construir un modelo de compensación ecológica asociado con la gobernanza de gestión de proyectos
- Validar el modelo propuesto a través de aplicación práctica en datos reales obtenidos de distintos proyectos de compensación.

Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los modelos de compensación ecológica presentes en las metodologías y estándares de gerencia de proyectos más empleados y cómo se comparan entre sí?
- ¿Cómo se aplican los modelos de compensación más utilizados en la gestión de proyectos para medir los impactos en los sistemas ecológicos?
- ¿Cómo puede desarrollarse un modelo de compensación eficaz para evaluar el deterioro ecológico en la gobernanza de proyectos?
- ¿Qué procesos de validación son necesarios para asegurar la aplicabilidad del modelo de compensación propuesto, al emplearlo con base en información real de proyectos de compensación?

1.4 Justificación

La presente investigación está orientada a desarrollar un modelo de compensación como respuesta al deterioro ecológico experimentado por los ecosistemas afectados por la gobernanza de proyectos.

El modelo aporta un valor teórico significativo a la gobernanza de proyectos al articular tres paradigmas interrelacionados: el pospositivista, el pragmático y el biocéntrico. Desde la óptica del enfoque pospositivista, los efectos ambientales derivados de los proyectos se entienden como realidades objetivas susceptibles de observación, medición y análisis mediante variables cuantificables. Entre ellas se encuentran las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la eficiencia energética y los créditos de carbono emitidos o retirados. Este punto de vista sustenta el modelo con evidencias empíricas verificables, lo que permite una aproximación científica rigurosa al estudio y a la aplicación de la compensación ecológica.

Por su parte, el paradigma pragmático orienta el modelo hacia la acción, priorizando la resolución de problemas concretos que surgen a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida del proyecto. La combinación de métodos cuantitativos como el uso de análisis estadísticos por clúster y métricas ambientales con enfoques cualitativos que incorporan tipologías de proyectos, certificaciones de sostenibilidad y modalidades de mitigación fortalece el carácter práctico del modelo y lo convierte en una herramienta adaptable y pertinente según el contexto en el que se implemente.

Este enfoque contribuye al fortalecimiento de la teoría de la gobernanza de proyectos al integrar criterios de utilidad práctica, eficacia operativa y adaptabilidad al contexto, particularmente en aquellos sectores con alta incidencia ambiental. Desde una mirada biocéntrica o bioética, el estudio incorpora una dimensión ética que con frecuencia se relega en los modelos

de gestión tradicionales. Reconoce el valor intrínseco de los ecosistemas y plantea que la compensación ecológica debe ir más allá de su carácter financiero, sustentándose en principios de justicia ambiental, responsabilidad intergeneracional y protección de la vida en todas sus formas.

Esta perspectiva amplía los marcos teóricos convencionales de la gobernanza de proyectos hacia una comprensión más holística y ecolocéntrica, en la que se integran no solo indicadores de desempeño, sino también valores, principios y derechos propios de la naturaleza. En conjunto, los tres paradigmas que sustentan el modelo pospositivista, pragmático y biocéntrico posibilitan una propuesta teórica innovadora que concibe la compensación ecológica como una función transversal de la gobernanza ambiental, basada en evidencia empírica, aplicada a entornos reales y guiada por fundamentos éticos sólidos.

Desde una perspectiva política, esta investigación contribuye al fortalecimiento de la gobernanza ambiental en el ámbito de la gestión de proyectos, en coherencia con los compromisos climáticos asumidos por los Estados en el marco de acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París. La propuesta de un modelo estructurado de compensación ecológica ofrece insumos relevantes para la formulación de políticas públicas, la definición de lineamientos técnicos y el diseño de sistemas de monitoreo que mejoren la trazabilidad y la eficacia de las acciones de mitigación impulsadas por los gobiernos y los sectores estratégicos.

Desde la perspectiva económica, el modelo propuesto contribuye a optimizar la toma de decisiones relacionadas con las inversiones en sostenibilidad y la adquisición de créditos de carbono, al ofrecer criterios técnicos que facilitan la selección de proyectos según su eficiencia, impacto y viabilidad. En el contexto de expansión del mercado voluntario de carbono, esta herramienta puede favorecer una asignación más estratégica de los recursos financieros y

estimular la valorización económica de iniciativas que generen un retorno ambiental significativo.

En el campo académico, esta investigación representa un aporte innovador al integrar variables de naturaleza técnica, ética y categórica provenientes de fuentes internacionales en un modelo operativo, verificable y susceptible de validación. La metodología empleada que comprende la operacionalización de variables, el análisis de conglomerados y la aplicación de herramientas estadísticas como R constituye una base de referencia para futuras investigaciones que busquen articular diversas disciplinas, en especial aquellas vinculadas a la gestión de proyectos, la sostenibilidad y la economía ambiental.

Desde una dimensión social, esta investigación aporta a la construcción de un modelo orientado a fortalecer la transparencia, la responsabilidad corporativa y la equidad intergeneracional en la gestión de proyectos. Al incorporar principios del paradigma bioético y promover la participación de las comunidades y los ecosistemas en los mecanismos de compensación, el modelo busca estimular prácticas empresariales más equitativas y propiciar efectos positivos en el tejido social y en la estructura territorial.

Desde un enfoque práctico, la investigación responde a la necesidad de mitigar los efectos del cambio climático mediante la implementación de acciones de compensación ecológica basadas en información cuantitativa y verificable. El modelo propuesto permite medir, comparar y seleccionar proyectos ambientales con base en criterios técnicos objetivos, fortaleciendo la coherencia de las estrategias ESG (ambientales, sociales y de gobernanza) y contribuyendo al cumplimiento de las metas de reducción de emisiones, tanto en el ámbito organizacional como en el sectorial.

Esta investigación aporta al grupo INDEVOS de la Universidad EAN al integrar enfoques de sostenibilidad en la gestión de proyectos, especialmente desde la compensación ecológica y la triple línea base. Vinculada con las soluciones basadas en la naturaleza y los cambios transformativos hacia la sostenibilidad, propone modelos que fortalecen la incorporación de criterios ambientales en la planificación y ejecución de proyectos. Asimismo, su enfoque técnico en la medición de la huella de carbono, la eficiencia energética y las tecnologías limpias complementa el eje de ERES y AOPP al ofrecer herramientas que optimizan los recursos y reducen los impactos ambientales. En conjunto, la investigación contribuye a la resiliencia ambiental y social frente a los retos del contexto contemporáneo.

Al priorizar la utilidad, la aplicabilidad y la flexibilidad del modelo, se busca promover un cambio significativo, asegurando que nuestras decisiones se fundamenten en estrategias efectivas y adaptadas a la realidad. Adicionalmente, la adopción de un enfoque pospositivista permite reconocer que el impacto ambiental es una realidad cuantificable mediante emisiones, eficiencia energética o créditos de carbono. Paralelamente, entender este fenómeno conlleva aceptar las incertidumbres que lo rodean, mejorar constantemente las métricas disponibles y utilizar los datos de manera rigurosa.

En este contexto, la investigación se basa en un enfoque pragmático que combina herramientas cuantitativas significativas, como el análisis de clúster en R, con enfoques cualitativos que evalúan criterios de elegibilidad, de gobernanza y de certificación. Esto da lugar a soluciones operativas prácticas que pueden replicarse en entornos organizativos reales.

Desde una perspectiva bioética, resulta esencial que el modelo no solo funcione con eficacia técnica, sino que también se sustente en principios de justicia ambiental, reconociendo el

valor intrínseco de los ecosistemas y la urgencia de integrar criterios éticos en los procesos de compensación ecológica.

Este enfoque representa más que una opción: una necesidad para garantizar un desarrollo auténticamente sostenible y responsable con el entorno. Desde una perspectiva práctica, se vuelve fundamental adoptar metodologías mixtas y enfoques aplicados que ofrezcan soluciones reales a un problema concreto: la falta de un modelo de compensación ecológica que resulte funcional y operativo para los tomadores de decisiones. Esta orientación no solo resulta pertinente, sino que también permite integrar herramientas cuantitativas como indicadores de emisiones, eficiencia energética y reducción de CO₂ equivalente con dimensiones cualitativas vinculadas al tipo de proyecto, al contexto nacional y a las certificaciones asociadas.

La comunidad académica, según Gabbatiss (2023), ha dedicado esfuerzos significativos a identificar los tipos de proyectos de compensación que más efectivamente contribuyen a la reducción de emisiones en el mundo real. Es ampliamente aceptado que los proyectos de eliminación de emisiones, como la plantación de árboles, son de mayor calidad, ya que físicamente retiran CO₂ de la atmósfera. La comunidad académica, según Gabbatiss (2023), ha dedicado esfuerzos significativos a identificar los tipos de proyectos de compensación que más efectivamente contribuyen a la reducción de emisiones en el mundo real. Es ampliamente aceptado que los proyectos de eliminación de emisiones, como la plantación de árboles, son de mayor calidad, ya que físicamente retiran CO₂ de la atmósfera. Sin embargo, debemos ser cautelosos, ya que estos proyectos no están libres de riesgos; la efectividad de la eliminación de CO₂ puede verse afectada si los árboles mueren o son devastados por incendios, una problemática que ya ha afectado a iniciativas de compensación en Estados Unidos y España. Por lo tanto, debemos considerar la alternativa más viable: la reducción o “evitación” de emisiones.

Esto incluye la implementación de turbinas eólicas y la evaluación de las emisiones evitadas en comparación con un escenario en el que, de no actuar, se construiría una planta de carbón.

Teniendo en cuenta la importancia que actualmente reviste el mercado voluntario de bonos de carbono para disminuir la huella de carbono con ocasión del desarrollo de proyectos, se ha seleccionado la base de datos elaborada por el Berkeley Carbon Trading Project la cual se fundamenta en su carácter integral, contemporáneo y estructurado desde el punto de vista técnico, lo que la convierte en una fuente primaria adecuada para el desarrollo del modelo de compensación ecológica que se propone en esta investigación. Esta base de datos compila información de los cuatro registros voluntarios más significativos a nivel mundial: American Carbon Registry (ACR), Climate Action Reserve (CAR), Gold Standard y Verra (VCS), que concentran la mayor parte de los créditos de carbono emitidos en el mercado voluntario global.

En el año 2024, según Grand view research (2025), el mercado voluntario global de créditos de carbono alcanzó un valor de 4,04 billones de dólares estadounidenses. Además, se anticipa una tasa de crecimiento anual del 35,1 % hasta el año 2030, momento en el que se prevé que el mercado alcance aproximadamente 23,99 billones de dólares. En 2024, de acuerdo con la International Carbon Action Partnership ICAP, (2016), el mercado voluntario global de créditos de carbono alcanzó la impresionante cifra de USD 4,04 billones. Es fundamental destacar que este sector presenta una proyección de crecimiento anual del 35,1 % hasta 2030, momento en el que se estima que podría alcanzar los USD 23,99 billones.

Examinar este mercado desde la perspectiva planteada en este estudio representa una acción estratégica para garantizar un futuro sostenible dentro de los marcos de gobernanza de proyectos. Según Gabbatiss (2023), cerca del 67 % de las principales corporaciones que han asumido compromisos de alcanzar emisiones netas cero recurren a las compensaciones de

carbono como parte de sus estrategias para cumplir dichas metas. Solo entre 2020 y 2022, estas organizaciones adquirieron más de 38 millones de toneladas de CO₂. Este panorama no solo evidencia la magnitud del desafío ambiental actual, sino que también subraya la urgencia de adoptar medidas efectivas y eficientes frente al cambio climático.

En consecuencia, este mercado ofrece una visión representativa de los mecanismos de compensación, al incluir información sobre créditos emitidos y retirados, tipo de proyecto, ubicación, año de registro y certificaciones. Su estructura permite extraer y homologar variables clave como emisiones evitadas (CO₂e), tipo de mitigación, eficiencia energética y uso de energías limpias, lo que facilita un análisis técnico y cuantitativo con respaldo empírico. Además, su actualización constante y su cobertura global brindan una ventaja metodológica al garantizar la fiabilidad y la trazabilidad de los datos utilizados.

De acuerdo con Økland (2015), dado que aproximadamente un tercio del producto interno bruto (PIB) mundial proviene de la ejecución de proyectos, resulta esencial incorporar enfoques integrales de sostenibilidad en su desarrollo. Las organizaciones que gestionan proyectos sin incluir medidas de compensación ecológica en la entrega de bienes o servicios corren el riesgo de perder relevancia y viabilidad a largo plazo. Si esta deficiencia no se corrige, existe el riesgo de mantener prácticas insostenibles que dificulten el cumplimiento de los compromisos ambientales internacionales y profundicen los impactos negativos de los proyectos sobre los ecosistemas.

La incorporación del enfoque de sostenibilidad en la gestión de proyectos implica una base ética que orienta la responsabilidad empresarial ante los impactos derivados de sus operaciones y decisiones. Este principio favorece la coherencia y la transparencia entre la

planificación y la ejecución, fortaleciendo la confianza de los distintos grupos de interés (Moreno et al., 2018).

Esto evidencia la necesidad creciente de analizar los factores no financieros que inciden en el desempeño de las empresas que desarrollan proyectos. Entre estos aspectos, se destacan las relaciones con los inversionistas y la divulgación clara y precisa de la información sobre la protección ambiental. En consecuencia, resulta imprescindible replantear los modelos de negocio y adecuarlos a los nuevos requerimientos de una rendición de cuentas más integrada y transparente (Katsarski, 2019). Desde esta perspectiva, para resolver el problema entre la compensación y el medio ambiente, en el sentido de la compensación ecológica, es de gran importancia estudiar el establecimiento de un mecanismo de compensación ecológica razonable y factible (Yan et al., 2020).

Esto se debe a que un sistema de compensación ecológica científico y razonable es una garantía importante para promover el desarrollo coordinado y equitativo entre regiones. Los existentes generalmente ignoran la premisa de que solo pueden ser aceptados por las partes interesadas si hay un alcance y un beneficio claros para los servicios ecosistémicos (Su et al., 2020).

.Los ecosistemas, por su fragilidad y alta sensibilidad frente al cambio climático, requieren especial atención y protección (Thierbach et al., 2015). No obstante, cuando no se cuantifican ni se valoran adecuadamente los daños ecológicos asociados a pasivos o gastos ambientales, resulta difícil definir estrategias que permitan estimar los recursos necesarios para su compensación y, con ello, asegurar la preservación de los ecosistemas.

Por ello, es fundamental identificar los ecosistemas sensibles con base en criterios ampliamente reconocidos. Un ejemplo de esta práctica son las denominadas *líneas rojas*

ecológicas, utilizadas actualmente como política nacional en países como China, que permiten delimitar y proteger sistemas ecológicos estratégicos, promover un desarrollo sostenible y salvaguardar la seguridad ambiental. Este enfoque define la escala y el alcance de los servicios ecosistémicos y puede incorporarse como herramienta en la formulación de políticas públicas y en los procesos de protección ecológica. (Xu, et al., 2019).

Por consiguiente, para reconocer la incertidumbre frecuentemente pasada por alto, pero ampliamente evidenciada respecto de la capacidad de la naturaleza para regenerar los ecosistemas, resulta necesario comunicar y documentar el diseño óptimo de los regímenes de compensación ecológica en los distintos procesos productivos de las organizaciones que ejecutan proyectos.(Jiang et al., 2019).

.Este escenario evidencia la necesidad urgente de desarrollar modelos de compensación ecológica integrados en la gobernanza de proyectos, que no solo cuantifiquen los impactos ambientales, sino que también incorporen criterios de sostenibilidad y equidad territorial. Si bien estos modelos representan un avance hacia la mitigación del deterioro ecológico, su eficacia depende del compromiso institucional y de la formulación de políticas públicas que protejan los ecosistemas afectados por las actividades productivas. La compensación ecológica transregional exige, además, una coordinación efectiva de fondos y el respaldo de medidas complementarias en materia política, económica y normativa, garantizando el equilibrio entre los diferentes actores involucrados (Wei, et. al, 2018)

A partir del marco teórico se definen las variables del modelo mediante una metodología que combina la revisión de la literatura, la descripción, la modelación y la validación. La propuesta constituye una herramienta de amplia aplicación para los gerentes de proyectos y sus

equipos, al tiempo que aporta fundamentos ontológicos y epistemológicos, con un enfoque biocéntrico y pragmático, en este campo disciplinar.

Los retos prácticos asociados a la creación de sistemas de contabilidad ecológica como las ecocuentas aplicadas a los bosques han cobrado relevancia creciente a partir de las transformaciones recientes en la legislación sobre la conservación de la naturaleza. (Pröbstl & Ammer, 2017). La compensación ecológica es una poderosa herramienta económica ambiental para la protección del medio ambiente en áreas donde se encuentran fuentes de agua potable (Xu et al., 2015) o cualquier otro recurso susceptible de ser compensado. La compensación de la biodiversidad, que implica reparar los daños ecológicos y ambientales causados por la actividad de desarrollo de diversos proyectos, ha ido ganando recientemente un fuerte apoyo político en todo el mundo (Laitila et al., 2014).

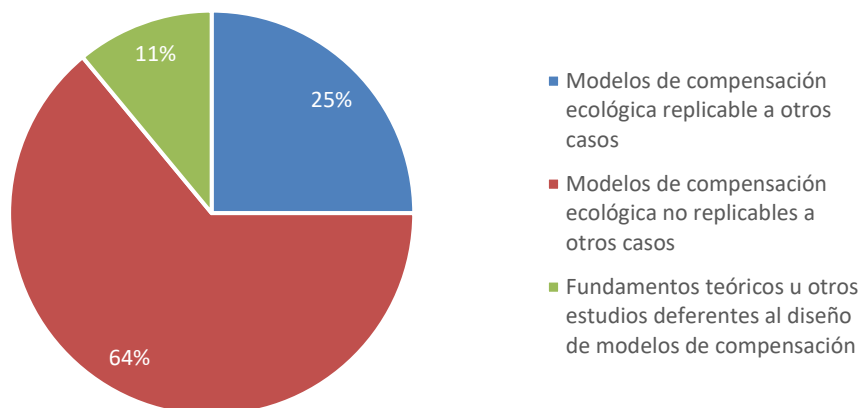
Abordar esta problemática requiere el respaldo de un equipo interdisciplinario, dada la complejidad inherente a los procesos de compensación ecológica. Sin embargo, las contribuciones de cada disciplina confluyen en un propósito común: asegurar el bienestar de las generaciones futuras y consolidar un compromiso colectivo con la preservación de los ecosistemas. En este sentido, los sistemas de indicadores ambientales aplicados al desarrollo de proyectos deben orientarse no solo al crecimiento económico, sino también al fortalecimiento del bienestar humano y a la mejora de las condiciones ambientales que determinan la calidad de vida de las comunidades.

Como lo evidencia la Figura 1, el 64 % de los modelos revisados en la búsqueda realizada para este estudio en bases de datos científica consultada en 2023, empleando la siguiente ecuación de búsqueda: “ecological AND compensation AND models AND

accounting”, se refieren a estudio de casos y sería necesario revisar si, de acuerdo con sus autores o con su estructura, pudieran aplicarse a contextos universales.

Figura 1

Trabajos referidos a los modelos de compensación ecológica



Nota. . Elaboración propia a partir de Scopus (2023).

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, resulta imperativo estructurar un modelo predictivo de compensación ecológica que, mediante el análisis de métricas de CO₂ equivalente, permita a la gobernanza de proyectos anticipar y valorar técnicamente el impacto ambiental derivado de la ejecución organizacional. Este enfoque trasciende la mera evaluación del daño físico, posicionándose como un instrumento de decisión estratégica que garantiza la trazabilidad y la responsabilidad bioética en la mitigación de la huella de carbono que logre superar brechas identificables a partir del estudio de los diversos modelos, métodos y metodologías desarrollados en esta misma línea de investigación.

En este contexto, asumir la sostenibilidad como principio ético y de responsabilidad en la gerencia de proyectos implica preservar los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas

afectados mediante el uso de métricas ecológicas que permitan evaluar el consumo de recursos y el nivel de contaminación generada. El acelerado deterioro ambiental, derivado del cambio climático y de la presión sobre los ecosistemas, evidencia la urgencia de implementar mecanismos de compensación basados en información verificable y en criterios técnicos confiables.

Sin embargo, la ausencia de herramientas metodológicas que permitan cuantificar y comparar proyectos ambientales de manera transparente limita la efectividad de las estrategias ESG y debilita la gobernanza ambiental. Por ello, resulta indispensable el desarrollo de modelos integrados de compensación ecológica que orienten la toma de decisiones, fortalezcan la gestión sostenible y contribuyan de manera tangible al cumplimiento de los compromisos globales de reducción de emisiones.

1.5 Alcance de la Investigación y limitaciones.

La presente investigación se circunscribe al diseño, validación y análisis de un modelo predictivo aplicado a la compensación ecológica, enmarcado en los procesos de gobernanza y gerencia de proyectos, con énfasis en la cuantificación del impacto ambiental mediante la métrica de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq). El alcance analítico se sustenta en el tratamiento sistemático de datos de gran escala provenientes del Berkeley Carbon Trading Project, los cuales comprenden un registro histórico consolidado de proyectos desarrollados en los mercados voluntarios de carbono a nivel global.

El estudio se desarrolla dentro de los siguientes alcances específicos:

Dimensión técnica:

El análisis se orienta al uso de técnicas avanzadas de regularización estadística, con el propósito de abordar simultáneamente problemas de alta dimensionalidad, multicolinealidad y heterogeneidad de variables. En este contexto, el alcance técnico incluye la evaluación de la capacidad del enfoque analítico para seleccionar variables estructurales relevantes, estabilizar estimaciones y mejorar la consistencia predictiva en la cuantificación de la compensación ecológica.

Dimensión metodológica:

El alcance metodológico comprende la articulación del análisis cuantitativo con los procesos de toma de decisiones en la gerencia de proyectos, permitiendo examinar cómo la información derivada de la modelación puede fortalecer la trazabilidad, la auditabilidad y la

reducción de la incertidumbre en la gestión del desempeño ambiental. El estudio se limita a evaluar esta integración desde una perspectiva analítica y de gobernanza, sin extenderse a la formulación normativa o regulatoria.

Dimensión geográfica y temporal:

La investigación utiliza una base de datos de cobertura internacional y carácter longitudinal, lo que posibilita el análisis comparativo de patrones y comportamientos de compensación ecológica entre distintos sectores, regiones y periodos de ejecución. El alcance empírico se enmarca en un esquema de validación fuera de muestra (out-of-sample), orientado a evaluar la capacidad explicativa y predictiva del enfoque analítico en contextos no observados.

Limitaciones y exclusiones:

El alcance del estudio se limita a la valoración técnica de emisiones y créditos de carbono expresados en CO₂eq, por lo que no aborda directamente dimensiones ecológicas cualitativas, tales como la conservación biológica in situ, la biodiversidad específica de los ecosistemas o los impactos socioambientales locales, los cuales requieren metodologías complementarias. Asimismo, los resultados obtenidos deben interpretarse como estimaciones probabilísticas, orientadas a la mitigación de la incertidumbre en la toma de decisiones gerenciales, reconociendo que la efectividad última de la compensación ecológica depende de la implementación de los mecanismos de gobernanza, la calidad de la ejecución de los proyectos y la estabilidad estructural de los mercados de carbono.

1.6 Organización del estudio

La investigación se organiza en cinco capítulos secuenciales y analíticamente articulados, cuya estructura responde a la lógica epistemológica del estudio y permite abordar de manera sistemática el problema de investigación desde su formulación conceptual hasta su validación empírica y la síntesis de implicaciones para la gerencia de proyectos.

Capítulo 1. Planteamiento del problema.

Este capítulo delimita el contexto de la investigación y formula el problema asociado a la ausencia de mecanismos analíticos que integren la compensación ecológica en la gobernanza de proyectos. Se establecen la pregunta de investigación, el propósito, el alcance y la justificación del estudio, enfatizando las limitaciones técnicas y bioéticas de los enfoques vigentes en los estándares de gerencia de proyectos.

Capítulo 2. Marco teórico y estado del arte.

Se desarrolla la base conceptual que sustenta la investigación, integrando los enfoques contemporáneos de sostenibilidad, de gobernanza de proyectos y de contabilidad ambiental. En particular, se examina la métrica de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) como unidad de referencia para la valoración del impacto ambiental y se realiza una revisión crítica de los modelos existentes, identificando las brechas teóricas y metodológicas que justifican el abordaje cuantitativo del problema.

Capítulo 3. Marco metodológico.

Este capítulo describe el diseño de la investigación desde un enfoque pospositivista y cuantitativo. Se detallan los procedimientos de recopilación, depuración y estructuración de datos provenientes del Berkeley Carbon Trading Project, así como los criterios analíticos empleados en la modelación estadística. Asimismo, se explicitan el esquema de validación, las técnicas de regularización y los supuestos que rigen el análisis empírico.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

Se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante la modelación estadística, y se evalúa el desempeño métrico de los enfoques analíticos empleados. La discusión se orienta a examinar la capacidad explicativa, la estabilidad y la reducción de dimensionalidad del modelo final, así como sus implicaciones para la identificación de variables estructurales relevantes en la compensación ecológica, reconociendo la naturaleza probabilística de las estimaciones.

Capítulo 5. Conclusiones y lineamientos.

Este capítulo sintetiza los principales aportes de la investigación en relación con la pregunta planteada y el marco conceptual desarrollado. Se formulan implicaciones para la gerencia y la gobernanza de proyectos, orientadas a fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia, la trazabilidad del desempeño ambiental y la responsabilidad bioética, así como a señalar posibles líneas de investigación futura.

2 Capítulo Marco teórico

2.1 Fundamentos Conceptuales, Métrica de Compensación y el Compromiso Bioético

La compensación ecológica se ha convertido en un instrumento clave para mitigar los impactos negativos que las actividades productivas generan en los ecosistemas. Este enfoque busca restaurar, proteger o fortalecer las funciones ambientales afectadas por el desarrollo de proyectos y adquiere cada vez mayor relevancia en la gestión de proyectos, donde la sostenibilidad debe asumirse no solo como un deber normativo o ético, sino como un elemento esencial para garantizar la viabilidad y permanencia ambiental de las iniciativas.

Siguiendo a Ferreira y Tarazona (2017), la evaluación de la sostenibilidad desde la dimensión ecológica debe apoyarse en métodos que permitan medir con rigor técnico y objetividad el impacto ambiental. Una herramienta clave en este proceso es el CO₂ equivalente (CO₂e), que actúa como factor de conversión para unificar las emisiones de distintos gases de efecto invernadero (GEI) en una única unidad comparable. Esto facilita el diseño de medidas más eficaces para reducir y compensar las emisiones. Este tipo de métricas ha impulsado la creación de créditos de carbono, instrumentos financieros que equivalen a una tonelada de CO₂e evitada o absorbida, que se negocian en los mercados de carbono bajo esquemas tanto regulados como voluntarios.

En este contexto, los créditos de carbono, según lo expuesto por (Dibello et al., 2024), constituyen una evidencia verificable de la reducción de emisiones, al permitir que entidades públicas y privadas compensen su impacto ambiental. Estos mecanismos, además, fomentan

procesos de desarrollo sostenible en territorios con alta vulnerabilidad ecológica. Por ello, el diseño de un esquema de compensación ecológica sólido y técnicamente validable en el marco de la gestión de proyectos resulta esencial para vincular objetivos ambientales con resultados sociales, económicos y técnicos. Incorporar esta perspectiva desde las etapas iniciales del proyecto favorece una toma de decisiones más informada, minimiza los impactos negativos sobre el entorno y fortalece la reputación corporativa, un aspecto cada vez más relevante en un contexto global que exige acciones climáticas comprobables.

2.1.1 Compensación ecológica.

La compensación ecológica se ha consolidado como una estrategia esencial para reducir los impactos ambientales derivados de las actividades productivas, desempeñando un papel central en la gestión de proyectos. Este enfoque trasciende las obligaciones éticas y regulatorias, al convertirse en un elemento indispensable para garantizar la sostenibilidad y continuidad ambiental de las iniciativas. En consecuencia, la incorporación de criterios de sostenibilidad desde las etapas iniciales del proyecto resulta fundamental para promover decisiones responsables, medibles y coherentes con los objetivos de conservación.

Evaluar la sostenibilidad desde la dimensión ecológica requiere métodos capaces de evidenciar los efectos con rigor técnico y objetividad (Ferreira y Tarazona, 2017). En este contexto, la métrica central es el CO₂ equivalente (CO₂eq), que sirve como factor de conversión para unificar las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero (GEI) en una unidad comparable. Esta medida sustenta la generación de créditos de carbono, instrumentos que representan una tonelada de CO₂eq evitada o absorbida y que se comercializan tanto en mercados regulados como voluntarios.

En este contexto, los créditos de carbono del mercado voluntario se reconocen como evidencia tangible de la reducción de emisiones, al permitir que las organizaciones compensen parte de su impacto ambiental (Dibello et al., 2024). En consecuencia, resulta fundamental diseñar un esquema de compensación ecológica sólido y técnicamente verificable en el marco de la gobernanza de proyectos. Este enfoque no solo articula los objetivos ambientales con los resultados técnicos, sino que también refuerza la credibilidad y reputación institucional frente a la creciente demanda global de acciones climáticas responsables.

Compensación Ecológica y la Jerarquía de Mitigación

Desde la perspectiva de la gobernanza de proyectos, estas acciones tienen un carácter complementario y se aplican únicamente cuando el daño ambiental resulta irreversible o persiste tras la ejecución de las medidas primarias de mitigación (Marín & Enríquez, 2022). Este enfoque resulta esencial para equilibrar la tensión entre el crecimiento económico y la preservación del medio ambiente (Nie et al., 2024).

La falta de un modelo de evaluación ampliamente aceptado para cuantificar el daño ecológico representa una brecha significativa que compromete la objetividad y la efectividad de los procesos de restauración. Esto evidencia la necesidad de contar con un sistema de medición y verificación técnica que respalde dichas acciones. A pesar de la brecha métrica identificada, la implementación actual de los planes de compensación en la gobernanza de proyectos se sustenta en metodologías de valoración indirecta y marcos regulatorios nacionales. En la práctica, esta evaluación se realiza mayoritariamente mediante el enfoque de equivalencia de hábitat o mediante la aplicación de multiplicadores de área, en los que se estima que, por cada hectárea impactada, se deben restaurar o preservar un número determinado de hectáreas con

características ecosistémicas similares (Charoentanaworakun et al., 2024). Sin embargo, este método carece de una unidad de medida universal, lo que se traduce en valoraciones heterogéneas que dificultan la auditoría técnica y la comparación de resultados entre diferentes jurisdicciones.

La viabilidad ambiental de los proyectos modernos se rige por la Jerarquía de Mitigación, un marco impulsado por organismos multilaterales como la Corporación Financiera Internacional (CFI) a través de su *Norma de Desempeño 6*, y el Banco Mundial (K. Haya et al., 2025). Esta jerarquía establece una secuencia lógica de actuación:

Evitar los impactos desde el diseño.

Minimizar aquellos que no se pudieron evitar.

Restaurar los ecosistemas degradados en el sitio.

Compensar los impactos residuales (Offsets).

Organismos como el *Business and Biodiversity Offsets Programme* (BBOP) y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en palabras de (K. Haya et al., 2025), han estandarizado metodologías para estimar los daños basadas en el concepto de **"Pérdida Neta Cero" (No Net Loss)**. No obstante, la transición hacia una gobernanza de proyectos basada en la analítica de datos como la propuesta en esta investigación busca superar la subjetividad de estos métodos tradicionales mediante la adopción del **CO₂ equivalente (CO₂eq)**. Esta métrica permite alinear la jerarquía de mitigación con la realidad de los mercados voluntarios de carbono, transformando la viabilidad ambiental en un indicador de gestión técnica y financiera auditable.

2.1.2 Deterioro ecológico.

En el ámbito de la gestión de proyectos, el daño ecológico se debe principalmente a una planificación deficiente que no considera los impactos ambientales. Dicho deterioro se manifiesta en la contaminación del aire, del agua y del suelo, la pérdida de biodiversidad y la degradación de ecosistemas esenciales. Asimismo, está vinculado a decisiones productivas relacionadas con el uso de recursos naturales y la adopción de tecnologías orientadas, en muchos casos, a objetivos económicos que omiten una evaluación integral de la sostenibilidad. El crecimiento demográfico y el avance tecnológico, si no se gestionan desde un enfoque ambiental preventivo, pueden intensificar estos efectos. Por ello, la incorporación de criterios ecológicos en todas las fases del ciclo del proyecto resulta fundamental para prevenir daños irreversibles y promover un desarrollo verdaderamente sostenible (Zurrita et al., 2015).

El deterioro ecológico, según (Yamasaki, 2014), es una expresión compleja de los impactos acumulativos generados por actividades humanas como la industria, la extracción de recursos y la contaminación ambiental. Su análisis requiere una visión sistémica que abarque distintos niveles de organización biológica, desde especies individuales hasta ecosistemas completos. En este contexto, los procedimientos de Evaluación del Daño a los Recursos Naturales (NRDA, por sus siglas en inglés) han emergido como herramientas clave para identificar y cuantificar las afectaciones ecológicas, especialmente en marcos legales como la Ley de Agua Limpia y la Ley de Contaminación por Petróleo en Estados Unidos.

Estas metodologías permiten establecer criterios técnicos y económicos para valorar las pérdidas ambientales y orientar los procesos de restauración o compensación. Integrar esta perspectiva en la planificación de proyectos resulta esencial para fortalecer los modelos de

compensación ecológica asegurando que las intervenciones no solo mitiguen los impactos sino que promuevan la recuperación efectiva del capital natural afectado.

2.1.3 El CO₂eq como Variable Métrica Central

Esta métrica constituye una herramienta fundamental para cuantificar y unificar el impacto ambiental generado por los distintos gases de efecto invernadero (GEI) (Charoentanaworakun et al., 2024). Su relevancia radica en que el incremento de la temperatura superficial del planeta está directamente asociado a las emisiones de origen antropogénico (Sekiya & Okamoto, 2010).

El CO₂ equivalente (CO₂eq) se determina a partir del Potencial de Calentamiento Global (PCG) como coeficiente de conversión, multiplicando la masa del gas emitido por su respectivo PCG en un horizonte temporal de 100 años (Ferreira & Tarazona, 2017) Esta estandarización constituye la base para cuantificar tanto las emisiones provenientes de fuentes principales como los combustibles fósiles, como el potencial de mitigación asociado a tecnologías de captura (Charoentanaworakun et al., 2024) o a modelos de biocaptura en sistemas agroecosistémicos (Meena et al., 2024). Sin esta métrica, la comparación entre escenarios y la toma de decisiones informadas para una compensación ambiental efectiva serían inviables (Sekiya & Okamoto, 2010).

La Tabla 1 resume, de acuerdo con los autores citados, la conveniencia del uso de la métrica CO₂eq en el modelado propuesto.

Tabla 1*Justificación técnica para el uso de CO₂eq en el modelo de compensación ecológica*

Elemento Clave	Estándar o Métrica Principal	Resultado de la Integración en la Gobernanza	Referentes guía
Problema Principal	Carestía de un Enfoque de Compensación Verificable	El foco exclusivo en la mitigación dentro de los estándares (P5, PMBOK, etc.) no aborda los impactos residuales, lo que debilita el propósito de la TBL (Moreno Monsalve et al., 2018).	(Moreno et al., 2018); (Rinaldi, 2023)
Métrica Clave	CO ₂ Equivalente (CO ₂ eq) y Potencial de Calentamiento Global (PCG)	Herramienta indispensable para cuantificar y estandarizar el impacto ambiental (emisiones y mitigación), facilitando la comparación rigurosa y la toma de decisiones informadas.	(Ferreira & Tarazona, 2017); (Sekiya & Okamoto, 2010); (Charoentanaworakun et al., 2024)
Resultado/Solución	Reinterpretación de la Triple Línea Base (TBL)	El pilar "Planeta" se convierte en una restricción obligatoria (Costo), y la compensación es un requisito de Alcance que debe ser verificable y medido con CO ₂ eq.	(Moreno et al., 2018); (Barajas, 2017)

Nota. Elaboración propia.

El CO₂ equivalente (CO₂eq) no constituye solo una métrica científica, sino el pilar técnico que hace posible la aplicación práctica de la sostenibilidad dentro de la gobernanza de proyectos. Al emplear el Potencial de Calentamiento Global (PCG) como factor de conversión para unificar el impacto de los distintos gases de efecto invernadero (GEI) en una sola unidad (Ferreira & Tarazona, 2017; Sekiya & Okamoto, 2010), el CO₂eq permite comparar y cuantificar las emisiones de manera estandarizada, proporcionando la base métrica necesaria para la gestión ambiental.

Su aplicación resulta esencial tanto para medir las emisiones derivadas de fuentes como los combustibles fósiles, como para evaluar el potencial de mitigación de soluciones tecnológicas

avanzadas, entre ellas la captura de carbono (Charoentanaworakun et al., 2024) y la biocaptura en sistemas agrícolas (Meena et al., 2024). En este sentido, el CO₂eq se convierte en el vínculo cuantificable que traduce los principios éticos de sostenibilidad en prácticas de gestión concretas, al servir como métrica central para estimar la compensación ecológica y avanzar hacia un análisis riguroso de los créditos de carbono.

2.1.4 Créditos de Carbono: Instrumento Financiero y Evidencia de Mitigación.

Los créditos de carbono constituyen instrumentos financieros clave que permiten a las organizaciones compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y gestionar de manera más eficiente su huella ambiental (Charoentanaworakun et al., 2024). Cada crédito equivale a una cantidad específica de CO₂ equivalente (CO₂eq) autorizada para emitir sin generar penalizaciones, lo que incentiva a las entidades que logran reducir sus emisiones a comercializar los excedentes en el mercado (Charoentanaworakun et al., 2024). Este mecanismo opera tanto en los mercados voluntarios de carbono (VCM) como en los mercados regulados, cuyo propósito principal es promover la reducción real y verificable de las emisiones globales (Méndez & Perugache, 2012).

El mercado de carbono constituye un sistema dinámico y complejo, condicionado por variables políticas, económicas y sociales (Méndez & Perugache, 2012). En él se transan principalmente dos tipos de activos: los permisos de emisión y las unidades generadas por actividades que efectivamente reducen gases de efecto invernadero. En el mercado voluntario de carbono (VCM), la actividad ha sido particularmente relevante; entre 1996 y 2023 se estima la generación de cerca de 1.800 millones de créditos, de los cuales más del 62 % provienen de iniciativas relacionadas con la conservación forestal (REDD+) y la producción de energías renovables (Dibello et al., 2024).

Formalización del Crédito de carbono como Activo Gerencial en la gobernanza de proyectos

El propósito de incorporar el estudio de los créditos de carbono es reconocer y consolidar este instrumento como el activo esencial que viabiliza la compensación ecológica dentro de la gobernanza de proyectos. Para los directores de proyecto, dichos créditos se transforman en un medio estratégico que permite alinear las operaciones con los objetivos corporativos de sostenibilidad, brindando la flexibilidad necesaria para gestionar de manera eficiente los impactos ambientales (Charoentanaworakun et al., 2024).

El alcance de los esquemas compensatorios varía en lo que se considera compensable, lo que dificulta la aplicación de un enfoque conceptual coherente entre esquemas con distintas necesidades (Cole et al., 2021). El análisis de compensación puede utilizarse para calcular los cambios en los ecosistemas asociados a aspectos concretos de una empresa (como un proyecto concreto, o un vertido de petróleo), o para comparar los resultados de diferentes alternativas (por ejemplo, en los análisis de inversión de capital). La VCE se utiliza para calcular y comparar las compensaciones de distintos impactos.

Valoración de la Calidad

La valoración y aceptación de los proyectos de compensación dependen en gran medida de su calidad técnica y ambiental, así como de los beneficios sociales adicionales que generen (Zhao & Lin, 2025). Los compradores que incorporan políticas de responsabilidad social corporativa suelen estar dispuestos a pagar precios más elevados por estos atributos, lo que convierte la calidad en un elemento clave dentro del mercado de carbono (Zhao & Lin, 2025).

La Brecha en la Trazabilidad, Verificación Metodológica y validación integral

El principal desafío radica en que, pese al crecimiento del mercado voluntario de carbono (VCM), la efectividad de los créditos de carbono se ve limitada por problemas de trazabilidad, adicionalidad y falta de estandarización. La mayoría de las certificaciones operan bajo esquemas voluntarios, lo que dificulta una evaluación integral del impacto real de los proyectos de compensación (Williams et al., 2025). Esta situación genera vulnerabilidades en la gestión de proyectos, ya que las inversiones destinadas a compensación no siempre se traducen en reducciones verificables de emisiones.

Heterogeneidad Metodológica y base para el diseño de mecanismos de control

Para calcular la huella de carbono se emplean diversos métodos, entre ellos el *GHG Protocol*, el *Balance de Carbono*, la norma *PAS 2050* y el *Método Compuesto de las Cuentas Contables* (Espíndola & Valderrama, 2012). Aunque todos parten del análisis del ciclo de vida, la coexistencia de diferentes enfoques puede generar inconsistencias en la recolección y organización de los datos, lo que dificulta tanto la comparación entre resultados como los procesos de verificación y auditoría.

Base para el Diseño de Mecanismos de Control

La comprensión de la estructura y los riesgos del mercado de carbono constituye la base para desarrollar mecanismos de control más sólidos que contribuyan a cerrar la brecha disciplinar mediante el fortalecimiento de la gobernanza de proyectos. En este sentido, resulta indispensable reforzar los procesos de validación, incorporar criterios sociales y ecológicos más rigurosos y promover una gobernanza transparente que garantice que los proyectos de

compensación contribuyan efectivamente a mitigar el cambio climático y a generar impactos positivos (Dibello et al., 2024).

En este contexto, y con el propósito de fortalecer la calidad técnica, la gobernanza de proyectos debe incorporar metodologías sólidas para la medición de la huella de carbono, alineadas con el enfoque de análisis del ciclo de vida. Asimismo, es necesario promover un marco técnico cuantificable que garantice la integridad de los créditos adquiridos y el cumplimiento de los objetivos establecidos en la Triple Línea Base.

En síntesis, los créditos de carbono constituyen el instrumento financiero fundamental que permite materializar el concepto de equivalente de CO₂ (CO₂eq), al establecer el vínculo operativo entre la métrica ambiental y la gobernanza de los proyectos. Estos créditos, que representan una cantidad específica de CO₂eq evitada o removida (Charoentanaworakun et al., 2024), se comercializan en un mercado complejo influido por factores sociales y económicos (Méndez & Perugache, 2012). No obstante, su efectividad y valor en la gestión dependen directamente de la calidad técnica y ambiental de los proyectos que los sustentan (Zhao & Lin, 2025).

La brecha disciplinar se origina en que los estándares de gobernanza vigentes aún no formalizan los mecanismos de trazabilidad y verificación necesarios para garantizar la calidad de los créditos, dejando de lado los desafíos propios del ámbito voluntario (Williams et al., 2025). En consecuencia, este análisis reafirma la urgencia de fortalecer los procesos de validación (Dibello et al., 2024) e incorporar metodologías rigurosas, como el análisis del ciclo de vida y la estimación de la huella de carbono (Espíndola & Valderrama, 2012), que aseguren que las inversiones en compensación contribuyan efectivamente al cumplimiento de los objetivos de la Triple Línea Base. En este marco, los créditos de carbono representan el activo esencial de la

compensación, y deben gestionarse como una restricción crítica y cuantificable dentro de la gobernanza de proyectos.

2.1.5 La Bioética, un enfoque en la calidad y co-beneficios

Este apartado concibe la bioética no solo como un principio orientador y biocéntrico, sino también como un eje transversal que eleva la compensación ecológica más allá del cumplimiento normativo o del simple cálculo técnico propio de un ejercicio positivista y pragmático. Desde esta perspectiva, el modelo propuesto se articula con la necesidad de integrar valores fundamentales para la preservación y la calidad de vida del ecosistema, tal como lo plantea Potter (1971), citado por (Burg & Spordeler, 2021).

Transición del Cumplimiento Legal a la Responsabilidad Intergeneracional

El propósito fundamental de incorporar la bioética en el modelo es asegurar que la compensación ecológica trascienda la mera prevención de sanciones o litigios, orientándose hacia un compromiso ético real con los ecosistemas afectados. Desde este enfoque, y con base en el fundamento bioético, se busca articular el conocimiento propio de la gerencia de proyectos con los valores esenciales para la continuidad de la vida humana y planetaria (Potter, 1971, citado por Burg & Spordeler (2021)). Esto supone asumir la responsabilidad intergeneracional y promover el cuidado de los ecosistemas mediante la reducción efectiva de la huella de carbono, en coherencia con los principios de equidad ecológica.

Complejidad y Justicia Ecológica

Implica la construcción de una ética capaz de reconocer la complejidad del conocimiento, integrar la incertidumbre inherente a los sistemas ecológicos y promover una justicia ambiental

que trascienda las generaciones, tal como destacan (Morín, 2011) y (Martínez, 2016) en el contexto latinoamericano.

Reduccionismo y Ausencia de Equidad Ecológica

La problemática identificada el deterioro ecológico derivado de las actividades humanas y de la huella de carbono que estas generan no puede abordarse únicamente mediante enfoques o metodologías técnicas (Tywoniak et al., 2021).

En este sentido, el riesgo del reduccionismo se manifiesta en la gestión tradicional cuando esta cede ante la dicotomía entre medios y fines o entre teoría y práctica, adoptando posturas extremas que simplifican la complejidad ambiental (Tywoniak et al., 2021). Bajo esta visión técnica, la compensación se interpreta como un costo o una transacción de créditos, desestimando el valor intrínseco de los ecosistemas. Esta limitación se origina, en parte, en la ausencia de un paradigma bioético en la gobernanza, lo que ha llevado a concebir la compensación ecológica como un procedimiento operativo carente de un compromiso ético basado en la prudencia, el altruismo y la responsabilidad hacia el entorno (Camargo et al., 2012).

Calidad de Vida, Co-beneficios y Convergencia de Paradigmas que fundamentan el modelo de compensación en la gobernanza de proyectos

El resultado de integrar la bioética como eje transversal es asegurar que la compensación ecológica contribuya a la supervivencia y calidad de vida del ecosistema y de los seres humanos (Burg & Spordeler, 2021).

Énfasis en Co-beneficios y Calidad:

El paradigma bioético orienta la toma de decisiones para que la compensación ecológica no se limite a la reducción cuantitativa del CO₂ equivalente, sino que también considere la calidad del impacto, priorizando iniciativas que generen co-beneficios sociales y ambientales. Desde esta perspectiva, la bioética otorga sustento existencial a la investigación al reconocer el deterioro ecológico como una problemática ética esencial. Su aplicación garantiza que los procesos se orienten hacia la armonía con el entorno y el fortalecimiento de la relación del ser humano con la naturaleza (Camargo et al., 2012).

El modelo de compensación ecológica se fundamenta en el paradigma pragmático, caracterizado por su ontología relacional y antidualista (Tywoniak et al., 2021), lo que permite integrar la bioética como principio transversal orientado a la equidad ecológica (Martínez, 2016). Esta base teórica asegura que la gestión de proyectos trascienda el ámbito puramente técnico, incorporando la responsabilidad intergeneracional y reconociendo la complejidad del conocimiento (Morín, 2011). De este modo, el modelo contribuye a cerrar la brecha existente entre el saber científico y los valores fundamentales para la continuidad de la vida en el planeta (Burg & Spordeler, 2021).

El modelo de compensación ecológica se erige sobre el Paradigma Pragmático por su ontología relacional y antidualista (Tywoniak et al., 2021), lo que permite integrar la Bioética como un compromiso transversal de equidad ecológica (Martínez, 2016). Esta estructura garantiza que la gestión de proyectos no se limite a un ejercicio técnico, sino que incorpore la responsabilidad intergeneracional y la complejidad del conocimiento (Morín, 2011), cerrando la brecha entre el saber científico y los valores esenciales para la supervivencia del planeta (Burg & Spordeler, 2021).

2.2 Estado del arte, y la triple brecha: de la limitación disciplinar a la necesidad del modelado predictivo

El estado del arte es fundamental en la investigación científica, según (SaThierbach et al., 2015), es acertado argumentar para este estudio, ayuda en la construcción de una perspectiva estratégica, como componente del adelanto científico de un campo del conocimiento a través de la construcción de teorías que fortalecen la praxis que se orienta en paradigmas construidos socialmente.

En ese sentido, el paradigma bioético orienta la toma de decisiones para que la compensación ecológica no se limite a la reducción cuantitativa del CO₂ equivalente, sino que también priorice la calidad del impacto, favoreciendo proyectos que generen cobeneficios sociales y ambientales. En este sentido, la bioética proporciona la justificación existencial del estudio al reconocer el deterioro ecológico como una cuestión ética esencial. De esta manera, garantiza que los procesos se orienten hacia la armonía con el entorno y el fortalecimiento de la relación del ser humano con la naturaleza (Camargo et al., 2012).

2.2.1 El Vacío de un Enfoque de Compensación en los Estándares de la Gobernanza de Proyectos.

La gestión de proyectos ha evolucionado desde un enfoque centrado en la Triple Restricción alcance, tiempo y costo, tradicionalmente considerada el núcleo del éxito de los proyectos (Moreno et al., 2018), hacia una visión más amplia que otorga igual relevancia a los aspectos ambientales, dada su influencia directa y futura en la creación de valor (Moreno et al.,

2018). Esta transformación sustenta el Imperativo de Valor y Sostenibilidad en los proyectos, hoy entendidos como instrumentos de cambio organizacional (Rinaldi, 2023).

Aunque la sostenibilidad continúa siendo un campo emergente con definiciones en proceso de consolidación, se reconoce como un objetivo estratégico ineludible (Barajas, 2017). En consecuencia, el gerente de proyectos, en su rol de agente de cambio, tiene la responsabilidad de impulsar prácticas que promuevan la sostenibilidad en todas las fases del ciclo de vida del proyecto.

Integración en Marcos Globales

El reconocimiento de la importancia de integrar los principios de sostenibilidad en la gestión de proyectos ha impulsado su alineación con marcos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Kehinde, 2018) y el enfoque de la Triple Línea Base (TBL). Este cambio se refleja en la incorporación progresiva de criterios de huella ambiental, responsabilidad social y viabilidad económica en las etapas de planificación, ejecución y evaluación de los proyectos.

Énfasis en la Mitigación de Impactos vs. Ausencia de un Mecanismo de Compensación

Si bien los estándares de gobernanza de proyectos ofrecen un marco normativo y metodológico sólido para incorporar criterios ambientales como la medición de la huella de carbono y el análisis del ciclo de vida, su énfasis se centra en la mitigación de impactos negativos (Moreno et al., 2018), dejando en segundo plano la compensación de los efectos inevitables.

La tabla siguiente presenta una comparación de los principales estándares de gobernanza de proyectos, destacando sus enfoques en sostenibilidad (mitigación) y la brecha disciplinar que este estudio busca abordar: la ausencia de un modelo verificable de compensación ecológica. El modelo propuesto pretende subsanar esta limitación al integrar el costo y la verificación de la compensación en la gestión de restricciones y riesgos del proyecto.

Tabla 2

Estándares y metodologías empleadas en la gerencia de proyectos y su dimensión ambiental desde la perspectiva de la compensación ecológica.

Estándar	Característica Principal de Sostenibilidad	Dimensión Ambiental (Énfasis)	Carencia Metodológica y Operacional que Resuelve el Enfoque Propuesto	Referencias
(GPM) P5	Incorpora explícitamente la Triple Línea Base (Personas, Planeta y Prosperidad) y promueve la gestión de riesgos y oportunidades mediante la metodología PRISM, complementada con el análisis de impacto P5.	Mitigación y Ciclo de Vida: Detalla las subcategorías (Transporte, Energía, Residuos) para la reducción del impacto y la evaluación de la huella ecológica del producto (González et al., 2018).	Foco en la Adicionalidad y LCC: Integración obligatoria de los costos de compensación en el análisis del Costo Total del Ciclo de Vida (LCC), y la necesidad de verificar la adicionalidad de los créditos para garantizar la neutralidad real (Ropo et al., 2025).	(González et al., 2018)
(PMI) PMBOK	Principios de Administración y Valor que promueven el compromiso ético y la sostenibilidad (Blanco, 2023). Extensión a la Construcción con un área de gestión ambiental (Barajas, 2017).	Identificación y Prevención: Enfoque en la identificación de características ambientales y en acciones preventivas (Barajas, 2017). No identifica los intereses socioambientales como dimensiones de influencia primarias (G. González, 2018).	Verificación del Riesgo de Compensación: Introducir filtros estratégicos (ej. análisis VROD y Ley de Benford) para evaluar la credibilidad de los créditos de carbono adquiridos y mitigar el riesgo de overclaim y las fallas de adicionalidad (Liu, 2025; Trencher et al., 2024).	(Blanco, 2023); (Barajas, 2017); (G. González, 2018)
(ICB4) IPMA	Competencia de Perspectiva que incluye la estrategia,	Cumplimiento y Alcance Sustentable:	Estandarización de la Compensación: Formalizar la	(Paneque, de la Torre; Angela; Slvador, Capuz;

“Planeta” se orienta a la reducción de impactos ambientales mediante subcategorías como transporte, energía, agua y residuos (González, 2018). Su metodología prioriza la identificación y gestión de riesgos y oportunidades de sostenibilidad, empleando un sistema de puntaje que actúa como herramienta de prevención y mejora continua. No obstante, su aplicación se centra en la mitigación de impactos, sin abordar de forma directa los procesos de compensación ecológica.

PMI, IPMA, PRINCE2 e ISO 21500

A pesar de la existencia de marcos conceptuales sólidos, los principales estándares de gestión de proyectos como los propuestos por el PMI, IPMA, PRINCE2 e ISO 21500 mantienen un enfoque limitado en materia de sostenibilidad y compensación ecológica. Si bien constituyen referentes esenciales para la gobernanza, la gestión del alcance y el control de riesgos, estos marcos carecen de la integración sistemática de un Plan de Gestión de la Sostenibilidad y de indicadores unificados que permitan evaluar con precisión el impacto ambiental y las acciones compensatorias (Villena et al., 2021). Esta carencia evidencia una brecha estructural entre las directrices teóricas y su aplicación práctica, lo que limita la capacidad de los proyectos para gestionar eficazmente su huella de carbono y responder a los retos ecológicos contemporáneos.

PMBOK (PMI)

Aunque el PMI ha avanzado en la incorporación de consideraciones ambientales como se evidencia en la *Extensión a la Construcción*, que incluye un área específica dedicada al medio ambiente (Barajas, 2017), y en el *PMBOK 7*, que reconoce la sostenibilidad como un principio esencial de la gestión (Blanco, 2023), esta integración continúa siendo principalmente preventiva. Se enfoca en la identificación de impactos y en la adopción de medidas de mitigación, sin formalizar procesos para la compensación de la huella ambiental residual.

Esta aproximación, similar a la propuesta del estándar P5 de GPM, se centra en la mitigación y reducción de impactos mediante la gestión de riesgos y oportunidades, pero sin establecer un proceso integral que contemple la compensación de la huella ambiental residual. Esta limitación profundiza la brecha disciplinar, dado que la compensación ecológica resulta indispensable para asegurar que las reducciones de CO₂eq sean auténticas y cumplan con criterios de rigor técnico, como la adicionalidad y la permanencia (Lee & Mayer, 2020). En consecuencia, aunque los marcos del PMI han avanzado en la sensibilización y la prevención ambiental, aún carecen de una herramienta metodológica cuantificable basada en el CO₂eq y en indicadores biofísicos que permita valorar, gestionar y compensar de forma sistemática el impacto ambiental inevitable de los proyectos.

ISO 21500 y PRINCE2

Aunque la ISO 21500 reconoce los impactos ambientales como parte del análisis de los grupos de interés (Rivera et al., 2023) y PRINCE2 incorpora la exigencia de establecer objetivos ambientales, ambos estándares presentan limitaciones al no ofrecer herramientas ni metodologías específicas para evaluar y gestionar dichos impactos más allá de las etapas de control y seguimiento del proyecto.

Reinterpretación de la Triple Línea Base (TBL) para Formalizar la Compensación

La brecha disciplinar central la ausencia de un enfoque explícito de compensación ecológica demanda una reinterpretación de la Triple Línea Base (TBL), entendida en su formulación original como el marco de *Lucro, Personas y Planeta* (Carboni et al., 2013). Esta nueva lectura propone que la TBL deje de concebirse únicamente como un instrumento de reporte y se consolide como una restricción obligatoria en la gobernanza de proyectos. Tal reinterpretación debe vincular directamente la sostenibilidad ambiental con las restricciones

clásicas del proyecto alcance, tiempo y costo, que constituyen el eje de atención de los profesionales de la gerencia (Moreno et al., 2018). En este sentido, se plantea una perspectiva orientada al cuidado del planeta que se refleje de manera integral en cada uno de los componentes de la Triple Línea Base.

A continuación se abordará cada uno de ellos

Del "Planeta" como Objetivo a su Inclusión en el "Costo"

Tradicionalmente, el gerente de proyectos busca equilibrar el alcance, el tiempo y el costo para asegurar resultados de calidad (Moreno et al., 2018). El enfoque propuesto amplía esta visión al incorporar el costo de la compensación como parte de la formalización del pilar *Planeta*.

Integración financiera obligatoria: El costo concebido como el presupuesto asignado a la planificación y el control del proyecto (Moreno et al., 2018) debe incluir explícitamente los gastos asociados a la compensación de carbono. Esto implica que el análisis del *Costo Total del Ciclo de Vida* (LCC) contemple no solo las emisiones operativas, sino también las incorporadas durante las fases de producción y transporte (Ropo et al., 2025).

Al cuantificar el impacto ambiental residual de un proyecto y asignarle un valor monetario verificable, el pilar *Planeta* deja de concebirse como un riesgo externo y pasa a convertirse en una restricción presupuestaria equiparable al tiempo o al alcance. De este modo, un proyecto solo puede considerarse exitoso cuando logra el equilibrio integral, es decir, cuando el costo final contempla la compensación completa de su impacto ambiental, asegurando así un resultado de calidad y verdaderamente sostenible (Moreno et al., 2018).

Del "Planeta" como Mitigación al "Alcance" como Compensación Verificada

La TBL tradicional enfatiza la mitigación para reducir los efectos negativos (Moreno et al., 2018). La reinterpretación exige que la compensación neta cero se integre en la definición del alcance: Alcance como Compromiso de Neutralidad: La definición y formalización del alcance (Moreno et al., 2018) debe incluir, desde el Acta de Constitución del Proyecto, el compromiso de compensar las emisiones residuales, convirtiendo la neutralidad en un entregable formal.

Verificación como Requisito de Calidad: Para asegurar el cumplimiento efectivo del alcance, la compensación debe adherirse a criterios rigurosos. El pilar "Planeta" se formaliza mediante la aplicación de herramientas de auditoría (como la Ley de Benford) y el análisis de VROD (Liu, 2025), garantizando que las Reducciones Verificadas de Emisiones (VER) sean trazables, creíbles y posean adicionalidad real (Trencher et al., 2024).

Propósito Transversal: Generación de Valor Sostenible

La conclusión esencial es que la reinterpretación de la Triple Línea Base (TBL) garantiza que el propósito transversal de todo proyecto la creación de valor para sus partes interesadas (Moreno et al., 2018) solo pueda alcanzarse si se incorpora explícitamente la dimensión de compensación ecológica. Un enfoque formal de compensación dentro de la gobernanza, orientado a proyectos que generen cobeneficios sociales y ambientales como los proyectos UTCUTS señalados por *Second Nature* (2020) fortalece el pilar *Personas*, al reducir los impactos negativos sobre el bienestar humano y mitigar el deterioro de la calidad de vida de las comunidades (Moreno et al., 2018).

La compensación, por lo tanto, no es un apéndice ético, sino un mecanismo de control disciplinar que armoniza la Triple Restricción con la Triple Línea Base, asegurando que el éxito

del proyecto sea ambientalmente responsable. La compensación, por lo tanto, no es un apéndice ético, sino un mecanismo de control disciplinar que armoniza la Triple Restricción con la Triple Línea Base, asegurando que el éxito del proyecto sea ambientalmente responsable.

2.2.2 De la Intención Metodológica a la Operacionalización

La principal brecha disciplinar radica en la ausencia de una verdadera operacionalización de los principios de sostenibilidad en modelos de compensación ecológica sólidos, medibles y adaptables (Moreno et al., 2018).

Transformación de la restricción: Para que el criterio ambiental se consolide como eje central en la toma de decisiones, debe integrarse directamente con las restricciones tradicionales del proyecto. Esto exige situar la sostenibilidad en el mismo nivel de gestión que el alcance, el tiempo y el costo (Moreno et al., 2018), de modo que la compensación ecológica se establezca como una restricción formal en la definición del alcance del proyecto.

En síntesis, aunque los marcos internacionales de gobernanza de proyectos reafirman el papel de la gestión como motor del desarrollo sostenible, el desafío contemporáneo radica en incorporar metodologías que permitan compensar de manera efectiva los impactos ecológicos que no pueden ser totalmente mitigados, fortaleciendo así la gobernanza ambiental desde la formulación hasta el cierre de los proyectos (Moreno et al., 2018).

A pesar de los avances logrados por estándares como P5 de GPM, PMBOK, IPMA, PRINCE2 e ISO 21500 en la integración progresiva de criterios de sostenibilidad ambiental (Moreno et al., 2018), persiste una brecha disciplinar sustancial: la ausencia de un enfoque de compensación ecológica explícito, verificable y metodológicamente sólido. Esta carencia impide consolidar la sostenibilidad como una restricción operativa en la gestión de proyectos (Rivera et al., 2023). El

problema radica en que los estándares se centran en la mitigación de riesgos (González et al., 2018) sin contemplar procesos formales para contrarrestar los impactos residuales inevitables, lo que genera deficiencias de adicionalidad y credibilidad en el mercado de carbono (Carter et al., 2021).

La propuesta metodológica se consolida en la reinterpretación de la Triple Línea Base (TBL), que deja de entenderse como un marco meramente conceptual para convertirse en una restricción estructural en la gobernanza de proyectos. Esto supone: **(1)** formalizar el pilar *Planeta* mediante la inclusión obligatoria de los costos de compensación en el análisis del *Costo Total del Ciclo de Vida* (LCC), vinculando de manera directa la restricción de costo con el compromiso ecológico (Ropo et al., 2025); y **(2)** asegurar la calidad del alcance a través de la aplicación de filtros estratégicos de auditoría como VROD y la Ley de Benford que fortalezcan la trazabilidad y la credibilidad de los créditos de carbono (Liu, 2025).

Este enfoque, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), permite que el proyecto cumpla su propósito esencial de generar valor al alcanzar una neutralidad ecológica verificable, cerrando la brecha entre la intención ética y la ejecución gerencial.

2.2.3 Modelos Financieros y el Déficit de la Ganancia Ecológica Neta

Aunque la compensación ecológica se sustenta en la jerarquía de mitigación (Wende et al., 2018), su aplicación histórica ha estado marcada por un enfoque esencialmente financiero, lo que representa una limitación tanto conceptual como ética. El problema principal radica en que los modelos de compensación tradicionales tienden a interpretar el deterioro ambiental como un riesgo económico, sin contar con mecanismos efectivos para asegurar una *ganancia ecológica neta* ni para restaurar de forma adecuada los ciclos vitales de los ecosistemas (Zhang et al., 2022).

Esta limitación se hace evidente al contrastar la práctica con los principios del *Paradigma Bioético*, que, según Potter (1971), exige una responsabilidad moral orientada a la continuidad de la vida y a la preservación de la calidad de los ecosistemas. Cuando la compensación se reduce únicamente a una métrica de carbono, sin considerar la calidad de su emisión ni los cobeneficios asociados como la conservación de la biodiversidad o los impactos sociales positivos, se corre el riesgo de convertirla en una mera “licencia para contaminar” (Gabbatiss, 2023).

En el contexto de esta investigación, dicha brecha se traduce en exigencias concretas para el proceso de modelado:

Criterio de calidad: El modelo debe incorporar variables asociadas a la calidad, tales como certificaciones de sostenibilidad (por ejemplo, *SD VISTa* o *Climate, Community & Biodiversity Standards – CCB*), que garanticen que la selección de los proyectos no solo responda a criterios de costo-efectividad, sino que también cumpla con principios éticos y de responsabilidad social, asegurando beneficios tangibles para las comunidades y la biodiversidad.

Rigor en la Adicionalidad:

2.2.4 De la Fragmentación a la Exigencia de Estabilidad Predictiva de un modelo de uso general en la gerencia de proyectos.

El modelo debe trascender el enfoque tradicional centrado únicamente en la *Reducción de Emisiones* (emisiones evitadas) y priorizar las estrategias de *Eliminación o Remoción* (carbono absorbido), dado que estas garantizan una mayor permanencia y responden a la crítica sobre la falta de adicionalidad es decir, la posibilidad de que el crédito se hubiese generado de todos modos (Lee & Mayer, 2020).

En este sentido, se requiere una herramienta capaz de evaluar las disparidades geográficas entre

países, a fin de asegurar que las inversiones en compensación contribuyan al fortalecimiento de la resiliencia ecológica en territorios ambientalmente vulnerables, en coherencia con un enfoque de equidad (B. Yu et al., 2016).

Disparidad metodológica:

Persiste la ausencia de un modelo unificado que estructure de manera integral la compensación ecológica, articulando criterios técnicos, éticos y territoriales en una misma plataforma de gobernanza.

El análisis comparativo de los principales estándares y metodologías de la gerencia de proyectos evidencia una fragmentación metodológica significativa en el tratamiento de la compensación ecológica. Como se observa en la Tabla 15, el estándar P5 de GPM constituye el referente más avanzado al integrar la sostenibilidad en todas las fases del ciclo de vida del proyecto y al emplear métricas específicas para su evaluación (Carboni et al., 2013). En contraste, otros marcos de amplia aplicación como PMI/PMBOK, IPMA, PRINCE2 e ISO 21500 abordan la sostenibilidad de manera general o periférica, sin ofrecer procedimientos formales para su medición ni mecanismos estructurados para compensar los impactos ambientales.

Esta heterogeneidad genera un vacío crítico que obliga a recurrir a herramientas externas y especializadas para la valoración y la toma de decisiones en materia de compensación ecológica. Dicho proceso debe sustentarse en criterios de estabilidad predictiva, garantizando que los resultados obtenidos sean consistentes, verificables y útiles para la planificación ambiental en el marco de la gobernanza de proyectos.

De la Fragmentación a la Modelación Predictiva

Ante la carencia de un marco metodológico sólido en la gobernanza de proyectos, la formulación de un modelo de compensación ecológica exige una selección rigurosa de técnicas de modelado capaces de abordar la complejidad y la heterogeneidad de los datos provenientes del mercado de carbono. Con el fin de asegurar que el modelo obtenido sea de aplicación general y responda al principio de equidad ecológica (Martínez, 2016), se adoptó un enfoque comparativo orientado a evaluar la capacidad predictiva, la estabilidad y la transparencia de distintas metodologías estadísticas. En este proceso se aplicaron tres modelos: inicialmente, un modelo de regresión; posteriormente, el algoritmo *Random Forest*; y finalmente, el modelo *Elastic Net*.

Regresión Lineal (Lineal)

La **regresión lineal múltiple** se consideró como punto de partida y como referencia base por su alto nivel de interpretabilidad. Esta técnica resulta esencial para identificar de manera transparente y matemáticamente comprensible los efectos marginales de las variables predictoras como los créditos emitidos y retirados. Su estructura simple permite estimar relaciones directas entre los parámetros del proyecto y la compensación ecológica, lo que genera métricas útiles para la gestión y la toma de decisiones. No obstante, su principal limitación radica en la sensibilidad a la multicolinealidad y en la suposición de relaciones estrictamente lineales, lo que puede derivar en una representación simplificada de un fenómeno que, en realidad, presenta una alta complejidad ambiental y económica.

Bosques Aleatorios (Random Forest)

La incorporación del algoritmo **Random Forest** (Cutler et al., 2012), perteneciente al ámbito del *machine learning* y basado en el ensamblaje de múltiples árboles de decisión, se justificó por su capacidad para modelar relaciones no lineales y captar interacciones complejas

entre variables. Esta cualidad resulta fundamental en el análisis de la compensación ecológica, donde los efectos derivados de factores tecnológicos o de la localización geográfica (país) no necesariamente siguen patrones aditivos o lineales. El método se encuentra en sintonía con la perspectiva de la complejidad propuesta por Morín (2011), al reconocer la interdependencia de los sistemas y la incertidumbre inherente a los fenómenos ecológicos. Su principal limitación radica en su menor nivel de interpretabilidad en comparación con los modelos paramétricos tradicionales.

Elastic Net (Regresión Regularizada)

La técnica **Elastic Net** (Nur et al., 2023), que combina las penalizaciones L1 (*Lasso*) y L2 (*Ridge*), fue seleccionada como la alternativa más sólida para la construcción del modelo final. Su principal fortaleza radica en la capacidad de abordar de manera simultánea dos desafíos estadísticos clave:

Selección de variables (Lasso): permite eliminar automáticamente variables irrelevantes o redundantes que introducen ruido en los datos, garantizando un modelo más parsimonioso y reduciendo el riesgo de sobreajuste durante el entrenamiento.

Estabilidad de coeficientes (Ridge): esta penalización corrige la inestabilidad derivada de la multicolinealidad es decir, la alta correlación entre las variables predictoras, fortaleciendo la robustez de los coeficientes y mejorando la capacidad de generalización del modelo.

La técnica *Elastic Net* se alinea plenamente con el **paradigma pragmático** descrito por Tywoniak et al. (2021), que orienta esta investigación. Al simplificar la estructura del modelo y evitar el reduccionismo asociado a la inclusión de variables irrelevantes, se favorece una aproximación antidualista que combina solidez matemática con interpretabilidad práctica para los gestores de proyectos. En conjunto, la comparación de estas tres metodologías constituye el

camino para determinar el modelo óptimo, capaz de transformar la actual fragmentación metodológica en una herramienta de estabilidad predictiva al servicio de la gobernanza de proyectos.

El desarrollo del modelo de compensación ecológica se apoya en un rigor metodológico esencial, orientado a superar la fragmentación de los estándares vigentes y la inestabilidad de las predicciones. La investigación identificó la ausencia de un enfoque estructurado de compensación como la problemática central en la gobernanza de proyectos, lo que justificó la construcción de un modelo de aplicación general. Para ello, se adoptó un enfoque comparativo que contrastó tres metodologías: la **Regresión Lineal**, el **Bosque Aleatorio (Random Forest)** (Cutler et al., 2012) y la **Regresión Regularizada con Elastic Net** (Nur et al., 2023).

La selección final de *Elastic Net* se debió a su desempeño superior frente a la heterogeneidad de los datos del mercado de carbono, ya que su doble penalización permite seleccionar automáticamente variables relevantes y estabilizar los coeficientes, mitigando los efectos de la multicolinealidad y garantizando un modelo parsimonioso. Este nivel de consistencia analítica asegura un resultado robusto y altamente interpretable, capaz de convertir la compensación ecológica en una restricción predictiva clave para la toma de decisiones técnicas, éticas y sostenibles en la gerencia de proyectos.

2.2.5 Definición y Fundamento de las Variables para el Modelo Predictivo

La base de datos utilizada en esta investigación proviene del **Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley** *Berkeley Carbon Trading Project* (K. Haya et al., 2025). Este repositorio compila la totalidad de los proyectos de compensación de carbono a nivel global, junto con la información relativa a la emisión y al retiro de créditos, organizada a través de cuatro registros

voluntarios más relevantes: **American Carbon Registry (ACR)**, **Climate Action Reserve (CAR)**, **Gold Standard** y **Verra (VCS)**.

Estos registros concentran la mayor parte de las transacciones de compensaciones voluntarias en el mercado internacional e incluyen créditos elegibles para su uso en programas de tope y de comercio de emisiones, como los de **California**, **Quebec** y **Washington**. La base de datos tiene como propósito fortalecer la transparencia del mercado de compensaciones, ofreciendo a investigadores y compradores un acceso centralizado a la información sobre proyectos y créditos. Además, sus herramientas gráficas interactivas permiten analizar tendencias temporales y explorar los proyectos activos según variables como la ubicación, el tipo, el registro o la categoría de mitigación.

Esta base de datos se utilizó como fuente principal de información para la presente investigación, dado que el **Registro de Carbono Benioff** de la Universidad de California reúne los criterios de cobertura global, confiabilidad institucional y validez técnica requeridos para el desarrollo del modelo predictivo.

Variables categóricas clave: el conjunto de datos incluye variables esenciales para evaluar la calidad y la dimensión ética de los proyectos como las certificaciones de sostenibilidad y el tipo de proyecto, así como variables vinculadas a la gobernanza, como el país de ejecución, indispensables para abordar la brecha bioética identificada.

Rigor institucional y verificación independiente: la base solo incorpora proyectos que han sido auditados por terceros, conforme a los lineamientos de la **Organización Internacional de Normalización (ISO)** y de entidades verificadoras reconocidas, como el **Protocolo del Proyecto** o la **Climate Action Reserve**.

Homogeneidad y cuantificación: constituye el único registro que divulga públicamente variables cuantitativas expresadas en unidades homogéneas de **CO₂eq**, abarcando todos los sectores. Esta característica facilita el procesamiento sistemático y estandarizado de la información, garantizando la comparabilidad necesaria para el análisis científico y la calibración precisa del modelo.

Aplicabilidad a la gobernanza: la estructura y las variables de calidad incluidas en la base de datos como las certificaciones de sostenibilidad y el *pool* de depósito permiten aplicar formalmente marcos de gobernanza ambiental en el diseño del modelo, incorporando de manera explícita la dimensión ética de la investigación. Además, al integrar los cuatro registros voluntarios más relevantes **ACR, CAR, Gold Standard** y **Verra**, esta base constituye la fuente más completa y confiable disponible, garantizando una cobertura global y una representación equilibrada de los mecanismos de compensación empleados en el mercado voluntario de carbono.

2.2.5.1 Variables Cuantitativas: El Capital de Carbono (Predictores de Peso)

El modelo de compensación ecológica exige identificar variables cuantitativas que actúen como principales predictores de la **reducción de CO₂eq**, con el propósito de sustentar la transición desde una gestión fragmentada hacia un enfoque de **estabilidad predictiva**. Estas variables, derivadas del **Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley** (K. Haya et al., 2025), representan el *capital de carbono* de cada proyecto, entendido como el conjunto de atributos que determinan su capacidad de mitigación. Su pertinencia se verificó a partir de los elevados coeficientes beta obtenidos en el modelo **Elastic Net**, lo cual confirma su consistencia técnica y su alineación con los principios del **paradigma pragmático** planteado por Tywoniak et al. (2021).

Fundamentación Ontológica y Métrica: Correlación entre Parámetros Categóricos e Indicadores Biofísicos para la Compensación.

Las variables **financieras y de capacidad** desempeñan un papel determinante en la compensación ecológica, debido a su impacto directo en la **escala, la eficiencia y la fiabilidad** de los proyectos. Estas variables reflejan no solo la magnitud del capital disponible para la ejecución y el mantenimiento de las iniciativas, sino también la solidez técnica de las operaciones que garantizan la permanencia de los resultados ambientales. En este sentido, su análisis es fundamental para evaluar la viabilidad de las compensaciones y su capacidad para generar **ganancias ecológicas netas** verificables (Zhang et al., 2022). Asimismo, la incorporación de estos indicadores financieros en el modelo fortalece la trazabilidad y permite vincular la sostenibilidad ambiental con las restricciones tradicionales de la gerencia alcance, tiempo y costo, en coherencia con la reinterpretación de la **Triple Línea Base (TBL)** propuesta por Moreno et al. (2018).

Capacidad Máxima (Créditos Totales Emitidos y Capacidad Total del Proyecto):

Estas variables son fundamentales, ya que representan la **capacidad máxima teórica de mitigación** que un proyecto puede lograr a lo largo de su vida útil. Dentro del modelo, constituyen los predictores con mayor peso estadístico reflejado en los coeficientes beta más altos, lo que los convierte en componentes esenciales para escalar y estimar con precisión la compensación ecológica esperada. La magnitud de estos activos determina la escala del esfuerzo compensatorio, lo que evidencia la solidez económica y la factibilidad operativa requeridas para garantizar resultados sostenibles. En este sentido, su incorporación responde a la necesidad de

articular la **viabilidad financiera** con la sostenibilidad ambiental, un principio que los estándares de gobernanza de proyectos, como el **PMBOK**, promueven al integrar la sostenibilidad en la definición contemporánea de valor (Blanco, 2023).

Demanda y Liquidez (Créditos Retirados y Créditos Restantes Disponibles):

Los créditos retirados constituyen un indicador directo de la demanda efectiva del mercado y evidencian la materialización tangible de la compensación ecológica, mientras que los créditos restantes reflejan la disponibilidad actual del activo en el sistema voluntario de carbono. En conjunto, estas variables actúan como un proxy de la madurez, la liquidez y el desempeño operativo del proyecto, factores esenciales para la toma de decisiones en la gerencia de proyectos. Un volumen elevado de créditos retirados no solo respalda la fiabilidad y la **trazabilidad** del mercado, sino que también contribuye a reducir la incertidumbre asociada a la **adicionalidad verificable**, uno de los desafíos más recurrentes en los esquemas de compensación (Carter et al., 2021).

Responsabilidad Ética (Depósitos Totales del Fondo de Reserva o Buffer Pool):

El Fondo de Reserva constituye una variable crítica dentro del modelo, ya que cuantifica la provisión destinada a mitigar el riesgo de reversión del carbono, como podría ocurrir ante incendios forestales, desastres naturales u otras fallas catastróficas. Su incorporación trasciende el plano técnico, al representar un componente esencial del criterio de Permanencia y de la responsabilidad intergeneracional en la gestión ambiental (Martínez, 2016). De esta manera, la variable contribuye a alinear el modelo con los postulados del paradigma bioético (Potter, 1971; Camargo et al., 2012), asegurando que la compensación ecológica no se reduzca a una simple

transacción económica, sino que exprese un compromiso ético sostenido con la conservación de los ecosistemas y el mantenimiento de la reducción de la huella de carbono a largo plazo.

Tabla 3

Variables Cuantitativas: El Capital de Carbono (Predictores de Peso)

Variable de Berkeley	Justificación Conceptual en el Modelo	Conexión con la Brecha
Créditos totales emitidos y capacidad total del proyecto	Representan la capacidad máxima teórica de mitigación del proyecto. En Elastic Net, estas variables tienen el mayor peso predictivo (beta más alta) y son fundamentales para escalar la predicción.	Mide la escala del esfuerzo de compensación.
Créditos retirados y Créditos restantes disponibles	Miden la demanda real del mercado y la disponibilidad actual, sirviendo como <i>proxy</i> de la madurez y la liquidez del proyecto.	Refuerza la fiabilidad y trazabilidad del mercado.
Depósitos totales del fondo de reserva (Buffer Pool)	Mide la provisión contra la reversión del carbono (p. ej., incendios).	Variable crucial para el criterio de Permanencia y la responsabilidad intergeneracional (Bioética).

Nota. Elaboración propia

El modelo de compensación ecológica requiere identificar y operacionalizar las variables cuantitativas clave que funcionan como los principales predictores de la Reducción de CO₂eq, permitiendo consolidar la transición desde una gestión ambiental fragmentada hacia un enfoque de estabilidad predictiva. Estas variables, obtenidas del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley (Haya et al., 2025), representan el capital de carbono de cada proyecto, entendido como el conjunto de atributos medibles que determinan su capacidad de mitigación efectiva.

La relevancia de estas variables se comprobó mediante los altos coeficientes beta obtenidos en el modelo Elastic Net, lo que evidencia su consistencia estadística y pertinencia dentro del marco analítico propuesto. Esta solidez metodológica está plenamente en consonancia con los postulados del paradigma pragmático (Tywoniak et al., 2021), que orientan la

investigación hacia la generación de resultados aplicables, verificables y funcionales para la toma de decisiones en la gobernanza sostenible de proyectos.

Justificación Conceptual

Las variables financieras y de capacidad son componentes esenciales del modelo de compensación ecológica, debido a su influencia directa en la escala, la sostenibilidad y la fiabilidad del esfuerzo de mitigación. Estas variables reflejan tanto la magnitud económica del proyecto como su potencial operativo para mantener los resultados ambientales a largo plazo, integrando dimensiones de eficiencia, estabilidad y permanencia del carbono. En esta investigación, dichas variables incluyen:

Capacidad Máxima (Créditos Totales Emitidos y Capacidad Total del Proyecto):

Demanda y Liquidez (Créditos Retirados y Créditos Restantes Disponibles):

Estas variables resultan fundamentales, ya que expresan la capacidad máxima teórica de mitigación que un proyecto puede lograr a lo largo de su vida útil. Dentro del modelo, actúan como los predictores de mayor peso estadístico (coeficientes beta elevados), lo que los convierte en elementos clave para escalar la estimación de la compensación ecológica. La magnitud de estos activos permite dimensionar la escala real del esfuerzo compensatorio, al tiempo que evidencia la viabilidad económica que los estándares de gobernanza como el PMBOK buscan incorporar en la definición contemporánea de valor de los proyectos (Blanco, 2023).

Los créditos retirados constituyen un indicador directo de la demanda efectiva del mercado y representan la materialización concreta de la compensación ecológica, mientras que los créditos restantes reflejan la disponibilidad actual del activo en el sistema voluntario de carbono. En conjunto, ambas variables funcionan como un proxy de la madurez, la liquidez y el

desempeño operativo del proyecto, dimensiones fundamentales para la toma de decisiones en la gerencia de proyectos. Un número elevado de créditos retirados refuerza la fiabilidad, trazabilidad y credibilidad del mercado de carbono, aunque este sigue enfrentando el desafío persistente de la verificación de la adicionalidad, es decir, la garantía de que las reducciones de emisiones no habrían ocurrido en ausencia del proyecto (Carter et al., 2021).

Responsabilidad Ética (Depósitos Totales del Fondo de Reserva o Buffer Pool):

El Fondo de Reserva constituye una variable esencial dentro del modelo, ya que cuantifica la provisión destinada a cubrir el riesgo de reversión del carbono, derivado de eventos como incendios forestales, desastres naturales u otras fallas catastróficas que puedan comprometer la permanencia del almacenamiento de carbono. Su incorporación trasciende el plano técnico y operativo, al representar un elemento clave del criterio de permanencia y de la responsabilidad intergeneracional en la gestión ambiental (Martínez, 2016). De esta manera, la variable refuerza la coherencia del modelo con los principios del paradigma bioético (Camargo et al., 2012), asegurando que la compensación ecológica no se reduzca a un mecanismo financiero, sino que exprese un compromiso ético duradero con la conservación de los ecosistemas y la estabilidad climática a largo plazo.

2.2.5.2 Variables Categóricas: Calidad, Contexto y Estabilidad del Modelo

Las variables categóricas desempeñan un papel fundamental en la construcción del modelo de compensación ecológica, ya que aportan contexto, calidad y trazabilidad que las variables numéricas, por sí solas, no pueden representar. Estas variables definen la naturaleza del proyecto, su ubicación geográfica y el estándar de certificación bajo el cual opera, proporcionando una base interpretativa indispensable para la evaluación integral de la sostenibilidad. En el modelo Elastic Net, su inclusión permite establecer efectos fijos

(coeficientes beta) asociados a categorías específicas, lo que garantiza un modelo más robusto, contextualizado y útil para la gerencia de proyectos, al reflejar tanto la diversidad técnica como las particularidades institucionales del mercado de carbono.

La inclusión de variables categóricas resulta esencial para evaluar la calidad técnica de la compensación ecológica, un aspecto que suele estar ausente en la mayoría de los estándares de gobernanza de proyectos, pero que resulta determinante para la credibilidad y legitimidad del activo de carbono. Estas variables permiten incorporar dimensiones de control de calidad, trazabilidad y verificación, fortaleciendo la confianza en los mecanismos de compensación y reduciendo el riesgo de greenwashing en el mercado voluntario (Williams et al., 2025).

Estandarización y Validez (Registro Voluntario):

El registro voluntario (ACR, CAR, Gold Standard o Verra) establece el estándar técnico y los criterios de validez que respaldan cada crédito de carbono. En la gobernanza de proyectos, esta variable desempeña un papel decisivo, ya que determina el nivel de rigor metodológico aplicado a la medición del CO₂ equivalente (CO₂eq). Su incorporación al modelo permite abordar una de las principales debilidades del mercado de compensaciones: la falta de estandarización y la carencia de mecanismos de verificación confiables, aspectos ampliamente señalados en la literatura especializada (Méndez & Perugache, 2012).

Contexto y Eficacia (Alcance, Tipo de Proyecto y País):

Las variables Alcance (sector de aplicación), Tipo de proyecto (naturaleza: mitigación o captura) y País (ubicación geográfica) constituyen predictores determinantes del modelo. Su análisis conjunto permite a la gerencia de proyectos comparar la efectividad ambiental entre

sectores y regiones, ofreciendo una visión más precisa del desempeño de la compensación ecológica. Este enfoque es esencial, pues las condiciones normativas, económicas y de mercado propias de cada país influyen directamente en la eficacia y viabilidad de los proyectos de compensación (Moreno et al., 2018). Al identificar los tipos de proyectos con mayor rendimiento en la reducción de CO₂eq, el modelo se articula con el Paradigma Bioético (Martínez Rueda, 2016), priorizando la equidad ecológica y territorial como principio orientador de la sostenibilidad.

Permanencia y Trazabilidad (Reducción/Eliminación y Nombre del Proyecto):

La variable Reducción/Eliminación desempeña un papel determinante en la evaluación de la permanencia o reversibilidad del efecto compensatorio, al distinguir entre las emisiones evitadas y las efectivamente removidas de la atmósfera. Esta diferenciación es esencial, pues se relaciona directamente con la responsabilidad intergeneracional y con la garantía de que los beneficios ambientales perduren en el tiempo.

Por su parte, la variable Nombre del proyecto contribuye a la identificación, la trazabilidad y la auditoría de cada activo de compensación, fortaleciendo la transparencia y la verificabilidad en la gobernanza de proyectos. Este nivel de control resulta crucial en un mercado altamente dependiente de la calidad de la información registrada (Dibello et al., 2024).

Calidad y Co-beneficios (Certificados de Sostenibilidad y Fecha de Registro):

Los Certificados de Sostenibilidad (como el CCB) constituyen un indicador clave de calidad, confianza y generación de cobeneficios sociales y ambientales en los proyectos de compensación (Zhao & Lin, 2025). Su presencia garantiza que la valoración del desempeño ambiental trascienda la mera métrica de carbono e incorpore dimensiones éticas y de desarrollo

sostenible.

Asimismo, la fecha de registro aporta información sobre la antigüedad y las tendencias temporales del proyecto, un elemento fundamental para asegurar la estabilidad predictiva del modelo.

En conjunto, estas variables categóricas permiten que el modelo Elastic Net identifique con precisión las características cualitativas que influyen en el rendimiento ecológico y la credibilidad de los proyectos, fortaleciendo la trazabilidad y el rigor técnico de la compensación.

Tabla 4

Justificación metodológica y conceptual de las variables incluidas en el modelo de compensación.

Variable de Berkeley	Justificación Conceptual en el Modelo	Conexión con la Bioética/Brecha
Registro Voluntario y Verificador	Garantizan la verificación por terceros, legitimando el dato frente a la crítica del mercado voluntario.	Mide el rigor técnico de la fuente del dato.
Reducción / Eliminación	Distingue entre Emisiones Evitadas y Remoción Activa, vinculándose directamente al criterio de Adicionalidad y Permanencia (Lee & Mayer, 2020)..	Variable de calidad técnica de la compensación.
Certificados de sostenibilidad	Miden la presencia de co-beneficios (sociales y de biodiversidad).	Conexión Directa con la Bioética (Williams et al., 2025): obliga a considerar la calidad ética, no solo el carbono.
País, Alcance, Tipo de proyecto	El modelo utiliza estas variables categóricas para crear dummies. Elastic Net gestiona esta altidimensionalidad para mostrar cómo la regulación, la tecnología y el contexto impactan la eficacia (coeficientes beta positivos o negativos).	Variable de Gobernanza y Universalidad del mod

Nota. . Elaboración propia

La inclusión adecuada de las variables categóricas otorga al modelo de compensación ecológica la capacidad de convertirse en una herramienta de aplicación general, superando la fragmentación metodológica observada en los estándares tradicionales de gerencia de proyectos.

Elementos como el Registro Voluntario determinan el rigor técnico con el que se valida el CO₂eq compensado, mientras que variables como País, Tipo de Proyecto y Alcance aportan el contexto necesario para evaluar la eficacia y elegibilidad de los créditos.

Esta configuración permite que la gerencia de proyectos trascienda la simple medición cuantitativa, incorporando dimensiones cualitativas como la permanencia diferenciada en términos de reducción o eliminación y la calidad ética, evaluada mediante certificados de sostenibilidad (Zhao & Lin, 2025). En conjunto, estas variables garantizan que el modelo Elastic Net no solo estime la cantidad de compensación, sino que también contextualice su legitimidad y cobeneficios, consolidando así un enfoque de equidad ecológica y responsabilidad intergeneracional dentro de la gobernanza ambiental.

En síntesis, el presente Marco Teórico consolida la base conceptual y metodológica necesaria para abordar la problemática central de esta investigación: la ausencia de un modelo de compensación ecológica integral y verificable en el ámbito de la Gerencia de Proyectos.

Se ha definido la Compensación Ecológica como un mecanismo de resarcimiento ambiental, sustentado en un Paradigma Bioético, que exige responsabilidad hacia los ecosistemas y la generación de cobeneficios sociales y ambientales (Williams et al., 2025).

La revisión del Estado del Arte permitió identificar una doble brecha: una disciplinar, derivada del tratamiento limitado de la sostenibilidad en los principales estándares (PMI, PRINCE2), y otra metodológica, asociada a la inestabilidad de los modelos actuales ante la alta dimensionalidad y la multicolinealidad de los datos ambientales.

Para superar estas limitaciones, se justificó el uso de las variables contenidas en la Base de Datos Berkeley desde los Créditos Emitidos hasta los Certificados de Sostenibilidad como insumos operativos esenciales para el modelado. Finalmente, se estableció el Elastic Net como

fundamento teórico y técnico para gestionar la complejidad estadística del sistema, asegurando la estabilidad, la parsimonia y la coherencia ética del modelo.

De esta manera, la teoría se convierte en una herramienta predictiva de gobernanza, capaz de vincular la evidencia empírica con los principios de sostenibilidad y de responsabilidad ambiental.

Para concluir, el Marco Teórico establece que la Gobernanza de Proyectos Sostenibles enfrenta una Triple Brecha crítica: la limitación disciplinar de los estándares de gestión, la ausencia de un mecanismo verificable de compensación y el déficit de ganancia ecológica neta. El análisis demuestra que, aunque la evolución de la gerencia ha incorporado los principios de sostenibilidad y la Triple Línea Base (TBL), los marcos actuales como PMBOK, IPMA y PRINCE2 se centran en la mitigación de impactos, sin formalizar un proceso que permita contrarrestar la huella ecológica residual.

El fundamento conceptual de la compensación se ancla en el CO₂eq, asumido como variable métrica central, indispensable para estandarizar los efectos de los gases de efecto invernadero (GEI) y posibilitar su comparación y control (Ferreira & Tarazona, 2017). No obstante, el estado del arte evidenció que la gestión de esta métrica sigue siendo fragmentada. Los créditos de carbono, pese a constituir el principal instrumento financiero y evidencia de mitigación (Dibello et al., 2024), presentan deficiencias en trazabilidad y adicionalidad (Carter et al., 2021). Este vacío muestra que los estándares aún no reconocen el crédito como un activo gerencial verificable, lo que exige diseñar mecanismos de control robustos que garanticen su integridad y validez operativa.

Finalmente, la compensación ecológica trasciende su dimensión técnica y se consolida como un compromiso bioético. La integración de la bioética como eje transversal resulta esencial

para avanzar del cumplimiento normativo hacia la responsabilidad intergeneracional y la equidad ecológica (Martínez, 2016). De este modo, el marco teórico rechaza cualquier forma de reduccionismo y reafirma que la sostenibilidad no puede limitarse a métricas de desempeño, sino que debe articular una visión ética, técnica y operativa de la gobernanza ambiental en los proyectos (Camargo et al., 2012).

El enfoque propuesto rechaza la visión reduccionista que concibe la compensación ecológica únicamente como un costo y adopta el Paradigma Pragmático (Tywoniak et al., 2021) para integrar el rigor científico con los valores éticos que sustentan la responsabilidad ambiental (Burg & Spordeler, 2021). El resultado esperado es un modelo centrado en la calidad de vida y en los cobeneficios sociales y ecológicos, orientado a garantizar una ganancia ecológica neta verificable.

La justificación técnica de este estudio radica en que la fragmentación de los estándares actuales obliga a la gerencia de proyectos a incorporar un modelado predictivo que proporcione estabilidad y coherencia operativa. En este sentido, la reinterpretación de la Triple Línea Base (TBL) permite formalizar la compensación al convertir el costo ecológico en una restricción gerencial medible, integrando la sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas.

Los resultados del análisis comparativo de modelos demostraron que los enfoques lineales tradicionales y los algoritmos de tipo Random Forest presentan limitaciones en la estabilidad y la capacidad explicativa. En contraste, el modelo Elastic Net emerge como la opción óptima, ya que su estructura matemática garantiza la selección de variables relevantes y la estabilidad predictiva del modelo (Nur et al., 2023).

En conclusión, el Marco Teórico sustenta la construcción de un Modelo Híbrido de Compensación Ecológica, que, partiendo de la métrica CO₂eq, utiliza la robustez estadística del

Elastic Net para validar la calidad de los créditos de carbono. Este modelo logra la convergencia entre la gestión técnica y el compromiso bioético, generando un valor sostenible, verificable y éticamente coherente.

3 Capítulo Metodología

3.1 Enfoque de investigación

El enfoque de esta investigación es estrictamente cuantitativo, sustentado en la necesidad de superar el déficit de modelado existente en la gobernanza de proyectos, reflejado en la ausencia de una métrica predictiva capaz de estimar la compensación de la huella ecológica residual. Esta elección metodológica se fundamenta en el Paradigma Pospositivista, el cual sostiene que la realidad ambiental es observable, medible y verificable empíricamente Kuhn, citado por (Ramos, 2015).

La robustez de esta investigación se valida a través de la eficacia predictiva de su marco estadístico, sustentado en una matriz de variables de alta dimensionalidad del mercado voluntario de carbono. La adopción del modelo Elastic Net se justifica por su capacidad para gestionar la multicolinealidad y realizar una selección parsimoniosa de predictores mediante la penalización L1, mientras estabiliza los coeficientes frente al ruido de datos con la penalización L2. Este enfoque rigurosamente cuantitativo trasciende la simple correlación, generando una función de transferencia verificable que minimiza el MSE y maximiza el R^2 ajustado, otorgando validez externa al modelo.

Desde esta perspectiva, el problema de la compensación ecológica se traduce en un desafío de cuantificación, cuyo objetivo es desarrollar un modelo predictivo que relacione variables ambientales mediante el CO_2eq , métrica globalmente homologada para comparar impactos de GEI (Ferreira & Tarazona, 2017).

Se emplean técnicas de modelado predictivo Elastic Net, Random Forest y Regresión Lineal Múltiple para estimar coeficientes verificables. La base de datos del Berkeley Carbon

Trading Project aporta variables numéricas (créditos emitidos, retirados, capacidad total) y categóricas (tipo de proyecto, certificación), las cuales fueron codificadas numéricamente para mantener la consistencia del enfoque y garantizar un modelo robusto, interpretable y de alta capacidad predictiva.

3.2 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación, de acuerdo con su propósito, es aplicada, no experimental.

Diseño Observacional y Ex-Post Facto

El diseño de la investigación es no experimental, dado que no existe manipulación de variables independientes ni asignación aleatoria de tratamientos. Se trata de un diseño observacional ex post facto, basado en el análisis de datos históricos certificados del Berkeley Carbon Trading Project, donde el investigador se limita a observar, medir y modelar las relaciones de asociación entre variables preexistentes, como los créditos emitidos, retirados y las categorías de registro.

Alcance: Correlacional-Predictivo y Aplicado.

La investigación busca establecer asociaciones y generar una función de transferencia predictiva mediante el modelo Elastic Net, sin manipulación experimental, lo que la sitúa dentro de los diseños no experimentales. Su carácter aplicado radica en la creación de una herramienta operativa un *Decision Support System (DSS)* que estima la compensación requerida en CO₂eq, orientando la toma de decisiones en la gobernanza de proyectos.

El enfoque se alinea con el Paradigma Pragmático, donde la validez del conocimiento se mide por su utilidad y efectividad operativa. En consecuencia, el modelo ofrece una solución verificable y replicable al déficit metodológico de los estándares internacionales, fortaleciendo la trazabilidad y el cumplimiento de los compromisos ESG y climáticos corporativos.

3.3 Alcance de estudio

El alcance metodológico de esta investigación se circunscribe a la formulación, evaluación y validación de un enfoque predictivo basado en técnicas de regularización estadística, orientado al análisis de la compensación ecológica en el contexto de la gobernanza de proyectos. Desde una perspectiva cuantitativa, el estudio se fundamenta exclusivamente en el procesamiento de datos secundarios de gran escala, utilizando como variable de referencia la métrica de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) para la estimación de la compensación ambiental.

3.3.1 Límites del modelado estadístico

El análisis se restringe a la aplicación comparativa de algoritmos de aprendizaje supervisado, seleccionados por su capacidad para gestionar alta dimensionalidad y multicolinealidad. En este marco, se consideran técnicas de regularización lineal y métodos de ensamble, cuya capacidad predictiva se evalúa en función de su desempeño métrico y estabilidad. El alcance del modelado se encuentra condicionado por la estructura, calidad y profundidad de los registros disponibles en el Berkeley Carbon Trading Project, los cuales comprenden variables técnicas, geográficas y metodológicas asociadas a proyectos certificados en mercados voluntarios de carbono, tales como VCS, Gold Standard, ACR y CAR.

3.3.2 Alcance operacional en la gobernanza de proyectos

Desde el punto de vista operacional, el enfoque metodológico no contempla actividades de medición biológica directa ni pretende sustituir inventarios ecológicos o estudios de campo específicos. Su alcance se limita a la generación de estimaciones cuantitativas orientadas a reducir la incertidumbre en las fases de planeación y de toma de decisiones gerenciales, particularmente en contextos en los que la compensación ecológica constituye un elemento relevante de la gobernanza del proyecto. La validez analítica de las inferencias se asegura mediante un protocolo de validación fuera de muestra (out-of-sample), basado en una partición de datos 70/15/15, diseñado para evaluar la capacidad de generalización del enfoque predictivo en escenarios no observados.

3.3.3 Delimitación de la variable dependiente

Para los fines de esta investigación, la variable dependiente se define de manera restrictiva como la cuantía de compensación ecológica expresada en unidades de carbono, conforme a los registros estandarizados de la base de datos analizada. En consecuencia, se excluyen del alcance metodológico otras formas de compensación ambiental como biodiversidad, servicios ecosistémicos hídricos o valores culturales cuya medición no se encuentra normalizada bajo la métrica de CO₂eq en la fuente de datos utilizada

3.4 Temporalidad de la investigación

La temporalidad de la presente investigación se enmarca en un diseño transeccional con enfoque retrospectivo y tratamiento de series temporales, lo que permite articular el análisis

estático del fenómeno con la observación de su evolución histórica. Este abordaje temporal se estructura a partir de las siguientes dimensiones:

Dimensión del diseño temporal.

El estudio adopta un enfoque transeccional, en tanto examina la compensación ecológica y el desempeño de los enfoques predictivos desde una perspectiva analítica definida, orientada a la evaluación del fenómeno en su estado actual de desarrollo. De manera complementaria, incorpora un componente retrospectivo, dado que el análisis se fundamenta en la observación sistemática de registros históricos acumulados sobre emisiones y créditos de carbono, lo que permite contextualizar el comportamiento del fenómeno a partir de evidencia empírica consolidada.

Horizonte temporal de los datos.

El alcance cronológico de la información analizada corresponde al conjunto de datos históricos sistematizados por el Berkeley Carbon Trading Project, los cuales comprenden el periodo que va desde la consolidación inicial de los mercados voluntarios de carbono representados en los estándares VCS, Gold Standard, ACR y CAR hasta la actualización más reciente disponible al año 2025. Este marco temporal amplio posibilita capturar la evolución de las métricas expresadas en dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), así como la variabilidad estructural de los factores de mitigación observados a lo largo del tiempo, reduciendo el sesgo asociado a fluctuaciones coyunturales o comportamientos estacionales.

Orientación prospectiva del análisis.

Si bien la base empírica utilizada es de naturaleza histórica, el enfoque analítico de la

investigación posee una finalidad prospectiva. El tratamiento de los datos permite generar estimaciones orientadas a apoyar la toma de decisiones en la fase de planeación de proyectos, utilizando los patrones históricos como insumo para anticipar escenarios futuros de compensación ecológica. Variables de estudio

Fundamento teórico-conceptual de las variables incluidas en el proceso de modelación:

3.4.1 Variable dependiente en el modelo de compensación

La variable dependiente del modelo corresponde a la compensación ecológica. Desde una perspectiva conceptual, la compensación ecológica se entiende como el conjunto de acciones, medidas o mecanismos implementados por una organización o entidad ejecutora de proyectos con el propósito de contrarrestar, mitigar o restaurar el deterioro ambiental derivado de sus actividades productivas o de desarrollo.

Dicho deterioro se refleja en la pérdida o degradación de los recursos naturales entre ellos el aire, el agua y el suelo, así como en la alteración de los ecosistemas, la disminución de la biodiversidad y la afectación de la vida silvestre. La compensación ecológica tiene como propósito equilibrar estos impactos mediante acciones verificables de restauración, conservación y manejo sostenible del entorno.

De acuerdo con el (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012), las compensaciones deben orientarse preferentemente a la preservación de áreas ecológicamente equivalentes a aquellas que han sido intervenidas o degradadas. En este sentido, la compensación ecológica busca restaurar, preservar o mejorar el equilibrio ambiental y la biodiversidad afectados por las actividades de la organización, mediante acciones concretas como la

reforestación, la recuperación de hábitats, la protección de especies vulnerables, la reducción de emisiones contaminantes y el uso racional y sostenible de los recursos naturales.

Tabla 5
Operacionalización de la variable dependiente

Objetivos	Variables	Definición operacional	Indicadores
Objetivo 1 Analizar los modelos de compensación ecológica desarrollados en las metodologías y estándares utilizados en gerencia de proyectos	Variable Dependiente 1: Compensación ecológica en la gobernanza de los proyectos.	Corresponde al conjunto de acciones, herramientas y enfoques implementados en un proyecto con el fin de compensar los efectos negativos sobre el entorno natural, incorporándose de manera transversal en los procesos de planificación, ejecución, seguimiento y cierre del proyecto. Reducciones: Se definen como el total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que han sido efectivamente reducidas, evitadas o eliminadas mediante iniciativas de compensación ambiental, de acuerdo con las metodologías y normativas internacionales de certificación de carbono. Proyección anual de reducciones certificadas, calculada según metodología del proyecto	- Toneladas de CO ₂ e reducidas/año.

Nota. . Elaboración propia

3.4.2 Variables independientes en el modelo de compensación.

Objetivo 2

- Determinar los componentes necesarios en la construcción del modelo de compensación ecológica que incluyen las variables, sus métricas, y técnicas de modelado para su desarrollo.

Tabla 6

Operacionalización de las variables independientes.

Variable	Definición operacional	Indicador/categorización	Tipo de variable/unidad de medida
----------	------------------------	--------------------------	-----------------------------------

Créditos totales emitidos	Capacidad máxima de mitigación certificada del proyecto	Número de créditos emitidos	Numérica Toneladas de CO ₂ e
Créditos retirados	Emisiones ya compensadas → no disponibles para nuevas transacciones	Número de créditos retirados	Numérica Toneladas de CO ₂ e
Créditos restantes disponibles	Créditos potenciales para usar en tu propio plan de compensación	Número de créditos restantes	Numérica Toneladas de CO ₂ e
Pool de depósito (reserva de riesgo)	Créditos bloqueados para contingencias → excluidos del cómputo directo	Número de créditos bloqueados para contingencias	Numérica Toneladas de CO ₂ e
Fecha de registro en la base	Permite análisis de antigüedad, tendencias, y actualización del modelo	Fecha de incorporación del proyecto a la base de datos	Numérica
Nombre del proyecto	Identificación y trazabilidad del proyecto	Nombre asignado al proyecto registrado	Categoría Asignación de coeficiente numérico
Registro Voluntario	Determina el estándar técnico y criterios de validez del crédito	Sistema de registro en el que está certificado el proyecto	Categoría Asignación de coeficiente numérico
Alcance	Clasificación por sector → análisis comparativo de efectividad ambiental	Área de aplicación del proyecto	Categoría Asignación de coeficiente numérico
Tipo de proyecto	Permite evaluar qué tipo de enfoque tiene mayor rendimiento en tCO ₂ e	Clasificación por naturaleza del proyecto según el registro	Categoría Asignación de coeficiente numérico
País	Permite análisis por región, legislación, y elegibilidad	Ubicación geográfica del proyecto	Categoría Asignación de coeficiente numérico
Certificados de sostenibilidad	Evalúa la calidad, confianza y co-beneficios sociales/ambientales	Certificaciones adicionales	Categoría Asignación de coeficiente numérico

Nota. . Elaboración propia.

La Tabla 6 presenta las variables depuradas de la base de datos, consideradas componentes esenciales para la construcción del modelo de compensación ecológica. Estas variables fueron procesadas mediante técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning), las cuales

permitieron el entrenamiento del modelo, la identificación de patrones significativos y la optimización de la toma de decisiones predictivas, con el fin de desarrollar el modelo propuesto de compensación.

Objetivo 3

- Construir un modelo de compensación ecológica en la gobernanza de proyectos.

Para este propósito, se aplicaron diversas técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) utilizando la información contenida en la base de datos desarrollada por el Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley (K. Haya et al., 2025), que examina en detalle los proyectos de compensación de carbono a nivel global, incluyendo tanto la emisión como el retiro de créditos.

Dicha base organiza la información en torno a los cuatro registros voluntarios principales del mercado internacional: American Carbon Registry (ACR), Climate Action Reserve (CAR), Gold Standard y Verra (VCS). A partir de estos datos, se evaluó el comportamiento de distintos modelos predictivos con el fin de determinar cuál ofrece el mejor desempeño estadístico y, por tanto, constituye la opción más adecuada para la construcción del modelo de compensación ecológica.

Objetivo 4

- Validar el modelo mediante su aplicación práctica con base en datos reales de proyectos de compensación.

Una vez identificado el modelo que presenta el mejor ajuste para representar la compensación ecológica en el contexto de la gobernanza de proyectos, se procede a su validación empírica. Para este propósito, se incorporan en la ecuación predictiva los datos extraídos de la base del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, los cuales proporcionan información verificable sobre las emisiones, retiros y demás variables asociadas al desempeño de los proyectos de compensación.

3.5 Hipótesis

Hipótesis Nula H_0 :

No existe una asociación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables del mercado voluntario de carbono y el volumen de compensación ecológica requerido. En consecuencia, el modelo econométrico no logra generar una función de transferencia con un nivel de precisión métrica (R^2) suficiente como para aplicarla de forma confiable en los procesos de gobernanza de proyectos.

Hipótesis Alternativa 1 (Asociación y Relevancia Estructural):

Existe una correlación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables cuantitativas y categóricas del mercado de carbono entre ellas, los créditos emitidos, los créditos restantes, la capacidad total, el tipo de proyecto y el registro y el volumen de CO_2eq a compensar en proyectos de gobernanza. Este resultado rechaza la hipótesis nula de independencia, lo que confirma la existencia de una relación estructural entre las características del proyecto y su capacidad de compensación ecológica.

Hipótesis Alternativa 2 (Rendimiento Predictivo del Modelo):

Es posible emplear un modelo con eficiencias en la predicción, mayor capacidad de generalizar y un comportamiento más estable frente a nuevos datos, con una solidez predictiva

que incremente la confianza en los resultados y brinde un soporte más consistente para la toma de decisiones en la gestión de proyectos. Una estabilidad superior es indispensable para enfrentar la dispersión metodológica existente en los marcos de gobernanza y, a su vez, permite el uso del modelo como un sistema confiable de apoyo a la toma de decisiones (DSS).

Hipótesis Alterna 3 (Eficacia de la compensación contextual):

Las variables categóricas asociadas con la calidad técnica y la trazabilidad de los proyectos de compensación como el estándar de certificación, la tipología del proyecto (reducción o eliminación) y su localización geográfica al igual que las diferencias metodológicas y los contextos territoriales, influyen de manera diferenciada y significativa en la capacidad de lograr una compensación ecológica efectiva y condicionan la eficiencia del mercado voluntario de carbono, al determinar en qué medida los proyectos aportan un peso determinante la mitigación del cambio climático.

3.6 Muestra (n):

Este estudio no emplea una muestra intencional ni probabilística en sentido clásico, sino un **conjunto de proyectos certificados elegibles**, derivado de un marco registral consolidado. Se incluyen todos los proyectos disponibles en los registros VCS, Gold Standard, ACR y CAR que cumplen los criterios objetivos de inclusión definidos, sin selección discrecional por parte del investigador. Este enfoque garantiza transparencia metodológica, trazabilidad de los datos y validez externa dentro del mercado voluntario de carbono. Tomar la totalidad de la base de datos de Berkeley no como un universo azaroso, sino como un corpus técnico depurado, garantiza que el modelo Elastic Net se entrene con datos de alta fidelidad y asegura que la función de transferencia resultante sea aplicable a la gobernanza de proyectos reales con rigor bioético y financiero y se estructuró en dos niveles: el primero corresponde a una selección de 3.897 proyectos internacionales de compensación de carbono, provenientes de la base del Berkeley Carbon Trading Project, seleccionados según criterios de disponibilidad de datos y representatividad técnica. El segundo nivel comprende casos específicos por proyecto, contenidos en la base de datos.

Muestra de validación práctica (caso de aplicación del modelo)

Tipo: Selección dirigida (muestra intencional) de proyectos de compensación mediante bonos de carbono voluntarios disponibles en la base de datos del Berkeley Carbon Trading Project (BCTP).

Criterios de inclusión:

- Acceso público a la información.

- Datos cuantificables de emisiones de GEI en CO₂e.

La muestra, conformada por 3.897 registros del BCTP, constituye el corpus documental primario de análisis. Su elección se justifica por la trazabilidad técnica y la certificación internacional de la fuente (Verra, Gold Standard, ACR, CAR), lo que garantiza la validez externa de los resultados. Los criterios de inclusión aseguran la integridad y la homogeneización de los datos, condición esencial para la aplicación de modelos predictivos robustos como el Elastic Net.

3.7 Diseño del instrumento

Instrumento Conceptual-Analítico: El modelo Elastic Net constituye el instrumento matemático central de la investigación. Mediante la aplicación combinada de las penalizaciones L1 (Lasso) y L2 (Ridge), se permite medir, cuantificar y definir la función de transferencia entre las variables predictoras y la compensación ecológica requerida, resolviendo la insuficiencia métrica presente en los estándares de gobernanza.

Instrumento de Ejecución: El software R funciona como el entorno computacional esencial para la implementación, validación y comparación algorítmica del modelo, garantizando la trazabilidad y la replicabilidad de los resultados.

Si bien la recolección de datos se realizó mediante una técnica documental a partir de la base del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, el instrumento central de generación de conocimiento es el modelo estadístico Elastic Net, que actúa como eje integrador del análisis predictivo y de la validación empírica.

Procedimiento

1. Revisión documental sistemática

Revisión y análisis documental: Se lleva a cabo un análisis exhaustivo de la literatura científica, las normas internacionales (ISO 14064, ISO 21500), las metodologías de gerencia de proyectos (PMI, PRINCE2, GPM P5) y los estándares de compensación ecológica (Gold Standard, Verra). Este proceso permite identificar los conceptos clave, principios técnicos y marcos normativos que constituyen la base conceptual y estructural del diseño del modelo propuesto.

Recolección de datos secundarios

Recopilación y estructuración de datos: Se recopilan los datos de la Base de Datos de Compensaciones del Registro Voluntario v2025-04, desarrollada por el Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley (Universidad de California), que integra los principales registros internacionales de proyectos de compensación (ACR, CAR, Gold Standard y Verra). De esta fuente se extraen variables cuantitativas como créditos emitidos, retirados y capacidad total, junto con variables categóricas como tipo de proyecto, país de implementación y certificaciones de sostenibilidad, lo que conforma el corpus analítico del modelo.

Operacionalización y homogeneización de variables

Se definen las variables clave, sus unidades de medida (tCO₂e) y su función en el modelo. Las variables cuantitativas se convierten en magnitudes comparables y las categóricas se codifican para permitir su análisis estructurado y automatizado.

2. Diseño del modelo de compensación ecológica

3. Modelación de los datos en el software en R

Se utiliza R para agrupar proyectos similares mediante técnicas estadísticas, con el fin de validar internamente el modelo, identificar patrones y verificar la consistencia de las variables integradas.

4. Validación práctica del modelo

Se selecciona un sector que publique informes de sostenibilidad (p. ej., hidrocarburos, minería o energía), se extraen sus datos reales (emisiones, consumo energético, inversión en sostenibilidad) y se simula su compensación mediante el modelo diseñado.

5. Evaluación y ajuste del modelo

Se analizan los resultados obtenidos, se identifican posibles limitaciones y se realizan ajustes técnicos en función de la aplicabilidad y la coherencia del modelo en un entorno real.

6. Redacción de conclusiones y recomendaciones

A partir de la validación y los análisis realizados, se formulan conclusiones sobre la utilidad, la replicabilidad y la pertinencia del modelo, y se proponen mejoras futuras para su implementación en diversos sectores.

3.8 Validez del instrumento.

La validez del instrumento analítico empleado en esta investigación se aborda desde una perspectiva multidimensional, con el fin de garantizar que tanto su estructura conceptual–matemática como su entorno de implementación empírica sean coherentes con los objetivos de análisis propios de la gobernanza de proyectos y la evaluación de la compensación ecológica.

3.8.1 Validez de constructo: estructura del enfoque de regularización

La validez de constructo se sustenta en la adecuación del enfoque de regularización estadística adoptado para representar de manera consistente el fenómeno objeto de estudio. La combinación de penalizaciones $L1$ y $L2$ permite modelar la relación entre múltiples variables explicativas y la compensación ecológica expresada en CO_2 equivalente, superando las limitaciones de los enfoques lineales tradicionales frente a contextos caracterizados por alta dimensionalidad y multicolinealidad.

Desde esta perspectiva, la penalización $L1$ contribuye a la validez del constructo al forzar la exclusión de variables redundantes o irrelevantes, asegurando que la estructura final del modelo refleje únicamente aquellos factores con incidencia empíricamente significativa sobre la variable dependiente. De forma complementaria, la penalización $L2$ refuerza la estabilidad del instrumento al reducir la varianza de las estimaciones, permitiendo obtener coeficientes consistentes aun cuando los predictores presenten elevados niveles de correlación. En conjunto, esta arquitectura dual garantiza que el instrumento represente de manera fiel y operativa el constructo de compensación ecológica dentro de un marco de gobernanza de proyectos.

3.8.2 Validez de criterio y convergencia: entorno de implementación analítica

La validez de criterio se establece a partir de la evaluación comparativa del desempeño del instrumento frente a enfoques alternativos de predicción ampliamente utilizados en el análisis de datos ambientales. La implementación del análisis en el entorno estadístico R permite contrastar los resultados obtenidos con aquellos derivados de métodos no paramétricos de aprendizaje supervisado, evaluando criterios como capacidad predictiva, parsimonia e interpretabilidad.

Asimismo, la utilización de paquetes estadísticos consolidados y ampliamente validados en la literatura científica, como *glmnet*, asegura la trazabilidad del procesamiento, la correcta implementación de los algoritmos de regularización y la replicabilidad de los resultados por parte de otros investigadores. Este entorno de ejecución contribuye a la validez externa del instrumento, al garantizar que los procedimientos analíticos sean verificables y reproducibles en contextos de investigación comparables.

3.8.3 Validez empírica: protocolo de validación fuera de muestra

La validez empírica del instrumento se asegura mediante la aplicación de un protocolo de validación fuera de muestra (out-of-sample), orientado a controlar el riesgo de sobreajuste y a evaluar la capacidad de generalización del enfoque analítico. Para este propósito, la base de datos se dividió en una proporción técnica del 70% para entrenamiento, 15% para validación de hiperparámetros y 15% para prueba final, garantizando que la evaluación del desempeño se realice sobre datos no utilizados en la estimación del modelo.

La confirmación de la validez se apoya en métricas de desempeño ampliamente aceptadas en la modelación predictiva, entre las que se destacan un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0,77 y una reducción significativa del error estándar residual (RMSE). Estos resultados evidencian la capacidad del instrumento para generar inferencias cuantitativamente consistentes y confiables respecto a la cuantía de la compensación ecológica requerida, en escenarios reales de toma de decisiones y gobernanza de proyectos.

3.9 Validez de confiabilidad del modelo y de los datos

3.9.1 Validez del modelo y significancia en contextos no probabilísticos

Dada la naturaleza intencional y no probabilística de la muestra utilizada, la validez de los resultados de esta investigación no se sustenta en la inferencia estadística tradicional orientada a la extrapolación poblacional, sino en la validez predictiva, la estabilidad de los coeficientes y la capacidad de generalización técnica del modelo Hair et al. (2014) bajo el enfoque de regularización Elastic Net. En este contexto, el objetivo del análisis no es estimar parámetros poblacionales, sino construir una función explicativa robusta que permita modelar de manera consistente el comportamiento de la compensación ecológica a partir de datos técnicos verificados.

Interpretación de p-valores y significancia estadística

Siguiendo los lineamientos metodológicos para el análisis multivariado en escenarios de alta dimensionalidad y muestras no probabilísticas, la evaluación del modelo desplaza el énfasis desde la significancia individual de los coeficientes (p-valores) hacia la capacidad de

generalización fuera de la muestra (out-of-sample performance). En este estudio, los p-valores se emplean exclusivamente como indicadores exploratorios de la fuerza de asociación en el conjunto de entrenamiento, sin constituir el criterio principal de validación inferencial. La regularización introducida por el Elastic Net actúa como un mecanismo de control estructural que penaliza la complejidad del modelo, reduce la varianza de los estimadores y previene el sobreajuste, garantizando que las relaciones identificadas respondan a patrones sistemáticos y no al ruido estadístico.

Robustez del R^2 ajustado y del error de predicción (RMSE)

La solidez del modelo se evidencia en la coherencia entre un R^2 ajustado de 0,77 y un nivel de error de predicción (RMSE) consistentemente bajo. En modelos predictivos aplicados a datos técnicos auditados, la validez empírica se confirma mediante la capacidad del modelo para minimizar el error en observaciones no utilizadas durante el entrenamiento. Alcanzar una capacidad explicativa del 77% indica que las variables seleccionadas conforman una estructura funcional estable y parsimoniosa, lo que respalda la confiabilidad del modelo como herramienta analítica para la estimación de la compensación ecológica en proyectos comparables.

Alcance y límites de la generalización

Se reconoce que los resultados reflejan el comportamiento del mercado voluntario de carbono en el corpus técnico analizado. No obstante, la noción de “generalización” adoptada en esta tesis no debe interpretarse como una ley estadística universal, sino como una generalización analítica y operativa, válida dentro del marco técnico definido por las dimensiones de las variables y los estándares internacionales considerados. En este sentido, la robustez del algoritmo

garantiza que, para proyectos que compartan características estructurales equivalentes, el modelo proporcione estimaciones de la alícuota de compensación con un nivel de fiabilidad superior al de los métodos de cálculo determinísticos tradicionales, lo que constituye una herramienta de gobernanza basada en evidencia y orientada a la toma de decisiones.

La confiabilidad de esta investigación se sustenta en la consistencia interna del proceso de modelado y en la integridad técnica de la fuente de información utilizada, garantizando que el enfoque analítico adoptado constituya un instrumento estable y reproducible para la gobernanza de proyectos. En este sentido, la confiabilidad se aborda de manera integrada, considerando tanto la calidad de los datos de entrada como el comportamiento del algoritmo empleado para estimar la compensación ecológica.

En primer lugar, la confiabilidad de los datos se deriva del rigor metodológico del Berkeley Carbon Trading Project, que consolida registros históricos auditados conforme a los principales estándares voluntarios internacionales de carbono, entre ellos VCS, Gold Standard, ACR y CAR. Esta base de datos proporciona información con trazabilidad verificada, al integrar variables técnicas, geográficas y metodológicas bajo criterios de estandarización reconocidos. Adicionalmente, los procedimientos de depuración, limpieza y estructuración aplicados a los 3.897 registros analizados contribuyen a minimizar la presencia de valores atípicos y ruido estadístico, fortaleciendo la consistencia de las inferencias sobre la compensación expresada en CO₂ equivalente (CO₂eq).

Desde la perspectiva del modelo, la confiabilidad se fundamenta en la estabilidad algorítmica del enfoque de regularización estadística empleado. A diferencia de los modelos

lineales convencionales, la arquitectura empleada incorpora mecanismos explícitos de control de la varianza de las estimaciones, lo que reduce la sensibilidad del modelo ante fluctuaciones marginales en los datos de entrada. La combinación de penalizaciones permite obtener coeficientes más estables y evitar cambios abruptos en las predicciones, incluso en contextos caracterizados por multicolinealidad y alta dimensionalidad.

Finalmente, la confiabilidad se verifica empíricamente mediante un protocolo de validación cruzada y evaluación fuera de muestra, orientado a comprobar la estabilidad del desempeño predictivo en datos no observados. La implementación del análisis en el entorno estadístico R, junto con el uso de semillas aleatorias controladas y procedimientos reproducibles, garantiza la replicabilidad del estudio. El mantenimiento de un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0,77 en la muestra de prueba, compuesta por datos no utilizados durante el entrenamiento, confirma que el instrumento analítico ofrece estimaciones consistentes y confiables para apoyar la toma de decisiones en escenarios reales y futuros de gobernanza de proyectos.

3.10 Aplicación del instrumento

La aplicación del instrumento conceptual–analítico se desarrolló mediante un flujo de trabajo sistemático implementado en el entorno computacional R, orientado al procesamiento y análisis de la información proveniente del Berkeley Carbon Trading Project con el fin de establecer una función de transferencia para la valoración de la compensación ecológica. Este proceso se estructuró en una secuencia técnica coherente, diseñada para garantizar la consistencia estadística, la validez externa y la trazabilidad de los resultados.

En una primera etapa, se llevó a cabo un proceso de preprocesamiento y normalización de los datos, aplicado a los 3.897 registros iniciales de la base de datos. Este procedimiento incluyó la identificación y tratamiento de valores atípicos, así como la gestión de datos faltantes en variables críticas relacionadas con emisiones y créditos de carbono. Las variables de naturaleza categórica tales como tipo de proyecto, metodología y estándar de certificación fueron transformadas mediante técnicas de codificación binaria (*one-hot encoding*), permitiendo su incorporación en un marco matricial cuantitativo. Como resultado, se obtuvo un conjunto estructurado de 232 variables predictoras, aptas para su procesamiento mediante técnicas de regularización estadística.

Posteriormente, se procedió a la configuración y entrenamiento del modelo, para lo cual se aplicó una partición técnica de la muestra en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba, bajo una proporción 70/15/15. Este esquema permitió aislar la fase de ajuste de parámetros de la evaluación final del desempeño, reduciendo el riesgo de sobreajuste. La aplicación del instrumento requirió la optimización de los hiperparámetros que regulan el

balance entre complejidad y ajuste del modelo, garantizando una adecuada combinación entre selección de variables relevantes y control de la multicolinealidad. La determinación del nivel óptimo de penalización se realizó mediante validación cruzada, priorizando la minimización del error de predicción en datos no observados.

En la fase de ejecución analítica, el instrumento fue utilizado para estimar la cuantía de la compensación ecológica expresada en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq). Durante este proceso, el enfoque de regularización permitió reducir de manera significativa la dimensionalidad del problema, eliminando aquellas variables cuyos coeficientes resultaron estadísticamente nulos y conservando únicamente los predictores con mayor capacidad explicativa. El resultado de esta etapa es una ecuación lineal ponderada, que posibilita el cálculo reproducible de la alícuota de compensación a partir de las características técnicas, geográficas y metodológicas del proyecto analizado.

Finalmente, el desempeño del instrumento fue evaluado mediante un contraste comparativo con un algoritmo de aprendizaje no paramétrico, utilizado como referencia para analizar diferencias en capacidad predictiva e interpretabilidad. Esta etapa permitió constatar que, desde una perspectiva de gobernanza de proyectos, el enfoque de regularización ofrece ventajas sustantivas al combinar un nivel elevado de precisión reflejado en un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0,77 con una estructura interpretativa transparente. Dicha característica facilita que el gerente de proyectos identifique el efecto individual de cada variable sobre el resultado final de la compensación, fortaleciendo la trazabilidad, la auditabilidad y el soporte técnico de las decisiones adoptadas.

3.11 Preparación y procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos, se emplearon dos instrumentos principales: el software estadístico R, por su capacidad para la modelación predictiva avanzada, y la Base de Datos de Compensaciones del Registro Voluntario v2025-04, desarrollada por el Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley de la Universidad de California, Berkeley.

Preparación de los datos

Antes de la ejecución de los algoritmos en el entorno **R**, los datos del *Berkeley Carbon Trading Project* fueron sometidos a un proceso de normalización y codificación. La variable dependiente se estandarizó en **toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq)**. Las variables nominales (como 'Tipo de Proyecto' y 'Estándar de Registro') se codificaron mediante encoding one-hot para su procesamiento matricial. El periodo de observación abarca registros históricos consolidados hasta el año 2025, asegurando que el modelo capture la variabilidad estocástica de los mercados voluntarios de carbono bajo condiciones de validación fuera de muestra (*out-of-sample*).

Depuración de las variables en la base de datos

De la base de datos se excluyeron algunas variables categóricas, como lo expone la tabla 8, porque especificaba, a su vez, otras variables categóricas y no generaban un efecto significativo respecto a la compensación, como variable de interés. Las variables excluidas fueron específicamente de tipo categórico.

Tabla 7*Depuración de las variables de la base de datos Berkeley no incluidas en la modelación*

Encabezado de columna	Criterio de exclusión
ID del proyecto	Es un código de identificación interna en la base de datos pero no tendría relevancia en el procesamiento de los datos
Nombre del proyecto	Es fundamental para identificar el proyecto de compensación
Registro voluntario	Se requiere identificar el registro de créditos de carbono que emite y rastrea dichos créditos.
Proyecto ARB / WA	proyectos listados y no listados que aún no han sido elegibles
Estatus voluntario	Estado del proyecto en el mercado voluntario
Alcance	Sector beneficiado (agricultura, industria hogar)
Tipo	Tipo de proyecto para compensar
Reducción / Eliminación	Efecto del proyecto: Elimina, reduce, mixto
Metodología / Protocolo	metodología para el cálculo de las emisiones
Versión de la metodología	Explicación de la metodología o protocolo
Región	Sector, grupo de países
País	Pis específico donde se desarrolla el proyecto
Estado	Estado específico donde se desarrolla el proyecto
Ubicación del sitio del proyecto	Lugar específico del proyecto
Desarrollador de proyectos	Persona u organización responsable
Total de créditos emitidos	Número total de los créditos emitidos desde el inicio del proyecto
Total de créditos retirados	Número total de créditos retirados desde el inicio del proyecto
Total de créditos restantes	Valor residual entre créditos emitidos y créditos retirados
Depósitos totales del fondo de reserva	Reserva de créditos
Reversiones cubiertas por el grupo de búferes	Total fondos amortiguados por reversión de créditos
Inversiones no cubiertas por el grupo de búferes	Créditos emitidos utilizados en compensación por la reversión del proyecto. Reversiones no permitidas por los calificadores.
Créditos de búfer liberados al proyecto	Total de créditos devueltos al desarrollador del proyecto. No son tenidos en cuenta por los calificadores
Primer año de proyecto	Primer año de reducciones
Créditos emitidos por año de cosecha: 1996 - 2025	Créditos emitidos por año en que ocurrieron las reducciones/eliminaciones. Estos créditos emitidos se suman a la variable total de créditos emitidos desde el inicio del proyecto.
Créditos retirados o cancelados: 1996 - 2025	Créditos retirados por año en el que se produjeron las reducciones/eliminaciones. Estos créditos retirados se suman a la variable total de créditos retirados desde el inicio del proyecto.
Créditos retirados o cancelados en: Año desconocido	Créditos retirados o cancelados en el año de la retirada o cancelación. Los retiros de proyectos ARB representan retiros voluntarios
Créditos restantes por añada: 1996 - 2024	Valor residual entre créditos emitidos y retirados en el lapso 1996-2025
Propietario del proyecto	La organización, empresa o individuo propietario del proyecto. No se considera relevante para la modelación
Operador de proyecto de desplazamiento	La organización, empresa o individuo que opera el proyecto. No se considera relevante para la modelación
Designado autorizado del proyecto	La organización, empresa o individuo que tiene el derecho de rechazo previo de los créditos emitidos. No se considera relevante para la modelación
Verificador	Tercero certificado verifique que el proyecto cumple con los requisitos del protocolo y que las reducciones declaradas

Reducciones anuales estimadas de emisiones	Las reducciones de emisiones que el desarrollador espera producir anualmente según lo presentado en los primeros documentos del proyecto.
PERs (Créditos emitidos en años futuros)	Créditos ex ante, que son créditos emitidos antes de que se realicen las reducciones de emisiones de carbono. NO se considera relevante para la modelación
Registro / ARB / WA	Registro emitido inicialmente No se considera relevante para la modelación
Estado de ARB / WA	Registros enumerados en la tabla de emisión No se considera relevante para la modelación
Identificación ARB / WA	Número de identificación del proyecto. No se considera relevante para la modelación
ID de PoA / ID agregado	Grupos de proyectos. No se considera relevante para la modelación
Estado de PoA / AVA	Proyectos agregados o independientes. No se considera relevante para la modelación
Elegible para CORSIA	Proyectos elegibles para la aviación. No se considera relevante para la modelación por ser específicos para un sector
Proyecto listado	Fecha de inclusión en el registro. No se considera relevante para la modelación
Proyecto registrado	Fecha de aprobación en el registro
Certificaciones de sostenibilidad	Entidades certificadas. No se considera relevante para la modelación
Documentos de registro	Enlace a la página del registro y de los documentos. No se considera relevante para la modelación
Sitio web del proyecto	Acceso al sitio web, enlace. No se considera relevante para la modelación
Créditos Emitidos por Año de Emisión:1996 - 2025	Créditos emitidos por año. No se considera relevante para la modelación
Descripción del proyecto	Descripción ampliada del proyecto. No se considera relevante para la modelación
Nota. . s del Registro	Nota. . s del registro. No se considera relevante para la modelación
Nota. . s del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley	Nota. . s añadidas por la base de datos. No se considera relevante para la modelación
Fecha proyecto agregado a la base de datos	Fecha en que el proyecto fue agregado a la base de datos

Nota. . Elaboración propia

La tabla 9 presenta el listado de variables incluidas en el diseño del modelo, entre las que algunas son categóricas y otras numéricas.

La matriz de criterios de exclusión permitió depurar las variables provenientes del *Berkeley Carbon Trading Project Database*, garantizando la consistencia, pertinencia y comparabilidad de los datos utilizados en el modelo *Elastic Net*. Se conservaron únicamente aquellas variables que aportan información directa sobre la capacidad de mitigación, la permanencia, la gobernanza y la

calidad técnica de los créditos de carbono. Las variables administrativas, redundantes o no cuantificables se descartaron para evitar sesgos de modelación y problemas de multicolinealidad.

Tabla 8

Variables seleccionadas de la base de datos Berkeley para su incorporación al modelado.

Encabezado de columna (Variable final)	Descripción general / Justificación de inclusión
Nombre del proyecto	Permite la identificación y la trazabilidad del proyecto en el registro; variable descriptiva clave para vincular los datos y las verificaciones.
Registro voluntario	Define el estándar o sistema certificador (Verra, Gold Standard, ACR, etc.), fundamental para diferenciar las metodologías de emisión y validación.
Alcance	Indica el sector o área de aplicación (energía, forestal, residuos, etc.) relevante para analizar las diferencias sectoriales en la compensación.
Tipo	Representa la naturaleza del proyecto (reducción, remoción, mixto); variable categórica esencial para distinguir enfoques tecnológicos.
Reducción / Eliminación	Especifica el efecto ambiental principal del proyecto, vinculando la adicionalidad con la permanencia del carbono.
País	Facilita el análisis geográfico y normativo, considerando factores de gobernanza y las diferencias regulatorias.
de créditos emitidos	Expresa la capacidad total de mitigación certificada, una de las principales variables predictivas del modelo.
Total de créditos retirados	Indica la cantidad de créditos efectivamente utilizados o cancelados; representa la demanda real del mercado.
Total de créditos restantes	Mide el saldo operativo disponible para futuras transacciones o compensaciones y refleja la liquidez del proyecto.
Depósitos totales del fondo de reserva	Evalúa la provisión ante riesgos de reversión del carbono, vinculada al criterio de permanencia.
Primer año de proyecto	Permite analizar la antigüedad y madurez del proyecto; variable temporal relevante en la evaluación longitudinal.
Verificador	Acredita la validez técnica y transparencia del proyecto mediante auditorías externas certificadas.
Reducciones anuales estimadas de emisiones	Estima la capacidad proyectada de mitigación anual según los documentos iniciales; variable cuantitativa continua.

Proyecto registrado	Registra la fecha de aprobación oficial del proyecto dentro del estándar voluntario; indicador de formalización.
Fecha proyecto agregado a la base de datos	Permite el control temporal y de actualización de la información dentro del conjunto de datos del Berkeley Project.

Nota. Elaboración propia

Luego del proceso de depuración y verificación de pertinencia, se seleccionaron catorce variables finales provenientes del *Berkeley Carbon Trading Project Database*. Estas variables fueron retenidas por su relevancia explicativa en el modelo *Elastic Net* y su relación directa con los criterios de capacidad de mitigación, permanencia, gobernanza y calidad técnica. La selección final incluye tanto variables cuantitativas (créditos emitidos, retirados, restantes, fondo de reserva) como variables categóricas (tipo de proyecto, registro, país), garantizando un equilibrio entre la información estructural y la operativa. Este conjunto final constituye la base del modelo predictivo de compensación ecológica propuesto.

Además de las variables cuantitativas, que permiten evaluar la disponibilidad y la efectividad de los créditos de carbono, el modelo incorpora variables categóricas destinadas a caracterizar los proyectos. Estas incluyen el tipo de proyecto, el registro voluntario, el alcance sectorial, el país de implementación y las certificaciones de sostenibilidad, las cuales posibilitan un filtrado técnico para identificar aquellos proyectos que cumplen con los criterios de integridad ambiental, trazabilidad y permanencia, fundamentales para estrategias de compensación ecológica sólidas y verificables.

La tabla 10 contiene las variables cuantitativas las cuales se describen a partir de su uso metodológico dentro de la modelación para la compensación ecológica:

Tabla 9*Variables numéricas incluidas en la modelación.*

Variable	Uso metodológico en el modelo	Unidad
Créditos totales emitidos	Capacidad máxima de mitigación certificada del proyecto	tCO ₂ e
Créditos retirados	Emisiones ya compensadas → no disponibles para nuevas transacciones.	tCO ₂ e
Créditos restantes disponibles	Créditos potenciales para usar en la compensación	tCO ₂ e
Capacidad total del proyecto	Proyección total de emisiones que puede mitigar durante su vida útil	tCO ₂ e
Pool de depósito (reserva de riesgo)	Créditos bloqueados para contingencias → excluidos del cómputo directo	tCO ₂ e

Nota. . Elaboración propia.

La siguiente tabla presenta las variables categóricas que se utilizarán en el modelo.

Tabla 10*Variables categóricas empleadas en la modelación.*

Variable	Definición operacional	Indicadores / Categorización	Utilidad en el modelo
Nombre del proyecto	Nombre asignado al proyecto registrado	Nombre propio (string)	Identificación y trazabilidad del proyecto
Registro Voluntario	Sistema de registro en el que está certificado el proyecto	ACR, CAR, Gold Standard, Verra (VCS)	Determina el estándar técnico y criterios de validez del crédito
Alcance	Área de aplicación del proyecto	Forestal, energético, agrícola, residuos, etc.	Clasificación por sector → análisis comparativo de efectividad ambiental
Tipo de proyecto	Clasificación por naturaleza del proyecto según el registro	Mitigación, captura, eficiencia, sustitución tecnológica	Permite evaluar qué tipo de enfoque tiene mayor rendimiento en tCO ₂ e
Reducción / Eliminación	Mecanismo dominante del proyecto	Emisiones evitadas vs. carbono eliminado	Evalúa la permanencia o reversibilidad del efecto compensatorio
País	Ubicación geográfica del proyecto	Países miembros de los registros voluntarios	Permite análisis por región, legislación, y elegibilidad

Certificados de sostenibilidad	Certificaciones adicionales (ej. SDVISTA, CCB, FSC)	Presencia/ausencia de certificaciones adicionales	Evalúa la calidad, confianza y co-beneficios sociales/ambientales
Fecha de registro en la base	Fecha de incorporación del proyecto a la base de datos	Fecha (AAAA-MM-DD)	Permite análisis de antigüedad, tendencias, y actualización del modelo

Nota. Elaboración propia

Homogeneización de Variables Categóricas

Las variables categóricas del modelo requieren procesos de codificación y clasificación para ser procesadas en el software R debido a que este, no acepta datos alfabéticos ni alfanuméricos. Por ello, se asignó un número a cada categoría dentro de la variable como se explica en la siguiente tabla:

Tabla 11

Proceso de codificación de las variables para incluir en el software R

Variable	Codificación Técnica	Aplicación en el Modelo
Registro voluntario	Asignar número por estándar (1: VCS, 2: GS)	Comparar eficiencia o confiabilidad por tipo de registro
Tipo de proyecto / Alcance	Asignación de Código (De 1 a 59 para cada tipo: ej. Forestal, Energía...)	Evaluar qué tipo tiene mayor capacidad de mitigación
País	Asignación de un número a cada país o región. (De 1 a 105)	Ver elegibilidad por localización y marco normativo
Reducción vs Eliminación	Codificación (reducción, eliminación de larga duración, mixto eliminación del 1 al 4)	Identificar permanencia del beneficio ecológico
Certificaciones de sostenibilidad	Asignación de un número de 0–30 certificaciones. Cero por ausencia de certificación.	Medir la robustez y calidad del proyecto
Fecha de ingreso a la base	Variable de tiempo. Formato de fecha.	Identificar proyectos vigentes y actualizados

Nota. Elaboración propia

VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL ANÁLISIS

- Variables cuantitativas: créditos emitidos, créditos retirados, créditos restantes, capacidad total, espacio de depósito.

- Variables categóricas: tipo de proyecto, registro voluntario, país, certificaciones, reducción/eliminación.

En síntesis, la metodología aplicada para cumplir este segundo objetivo permitió identificar de manera sistemática y rigurosa los componentes esenciales del modelo de compensación ecológica. Este enfoque integral incorpora variables cuantitativas y categóricas procedentes de registros internacionales de carbono, lo que posibilita un análisis exhaustivo y comparativo. A través de la operacionalización precisa, la estandarización técnica y la categorización estructurada de los datos, se consolidó una base analítica robusta y confiable que facilita la evaluación, la clasificación y la proyección de acciones compensatorias bajo criterios objetivos. En consecuencia, este enfoque metodológico fortalece la trazabilidad, la comparabilidad y la aplicabilidad del modelo en diversos contextos de gobernanza sostenible, contribuyendo al diseño de proyectos con un impacto ambiental positivo y verificable.

Componentes del Modelo de Compensación Ecológica

La Tabla 13 sintetiza los componentes esenciales del modelo de compensación ecológica propuesto, integrando las dimensiones técnicas, normativas y operativas. Cada elemento cumple una función estratégica dentro del esquema general: las variables cuantitativas, expresadas en toneladas de CO₂ equivalente, permiten el modelado de la información procesada en R, mientras que las variables categóricas facilitan la clasificación y la valoración cualitativa de los proyectos de compensación. Asimismo, se incorporan herramientas analíticas y métodos estadísticos avanzados que permiten la construcción y la comparación de distintos modelos predictivos, lo que fortalece la solidez metodológica y la aplicabilidad práctica del estudio.

La validación mediante criterios de elegibilidad asegura la aplicabilidad del modelo en contextos reales de gobernanza ambiental en proyectos. Por último, el sustento conceptual y

normativo, fundamentado en marcos como el estándar ISO 14064, GPM-P5 y los principios de sostenibilidad, establece una base sólida para la fiabilidad metodológica del enfoque propuesto.

Tabla 12

Componentes del Modelo de Compensación Ecológica en la Gobernanza de Proyectos

Componente del Modelo	Descripción	Fuente/Origen de Datos	Función dentro del Modelo
Variables cuantitativas (en tCO ₂ e)	Créditos emitidos, retirados, restantes, capacidad total, reservas temporales	Base de datos de registros voluntarios (Berkeley Carbon Trading Project)	Medir y proyectar la capacidad efectiva de compensación
Variables categóricas codificadas	Tipo de proyecto, país, registro, certificaciones, tipo de mitigación	Etiquetas de los registros voluntarios (VCS, GS, ACR, CAR)	Filtrar y clasificar proyectos según robustez y confiabilidad
Unidad de referencia	Toneladas de CO ₂ equivalente (tCO ₂ e)	IPCC, ISO 14064, literatura científica	Unificar magnitud para comparar y operar las métricas del modelo
Estructura de datos en Excel depurada	Base de Datos de Compensaciones del Registro Voluntario v2025-04, Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, Universidad de California, Berkeley.	Base de datos de registros voluntarios (Berkeley Carbon Trading Project)	Aplicación práctica del modelo para decisiones de compensación
Análisis de datos (R)	Modelación de datos	Software R + base de datos de proyectos	Estructurar el modelo de compensación ecológica
Criterios de elegibilidad del Modelo más adecuado generado por R	Elegir el modelo con una mayor confiabilidad estadística	Criterios estadísticos	Elección del modelo más apropiado por su confiabilidad y eficacia
Marco conceptual y normativo	Sostenibilidad, gobernanza, compensación, estándares	Literatura científica, ISO 14064, GPM, PMI, IPMA y compensación ecológica.	Sustento teórico y normativo del modelo

Nota. . Elaboración propia.

Con el fin de alcanzar este objetivo, se implementó una metodología integrada que permite modelar el proceso de compensación ecológica desde enfoques técnicos, cuantitativos y cualitativos. El modelo se construyó a partir de las variables operacionalizadas, seleccionadas y estructuradas de la base de datos del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, que compila registros internacionales de proyectos certificados por ACR, CAR, Gold Standard y Verra (VCS).

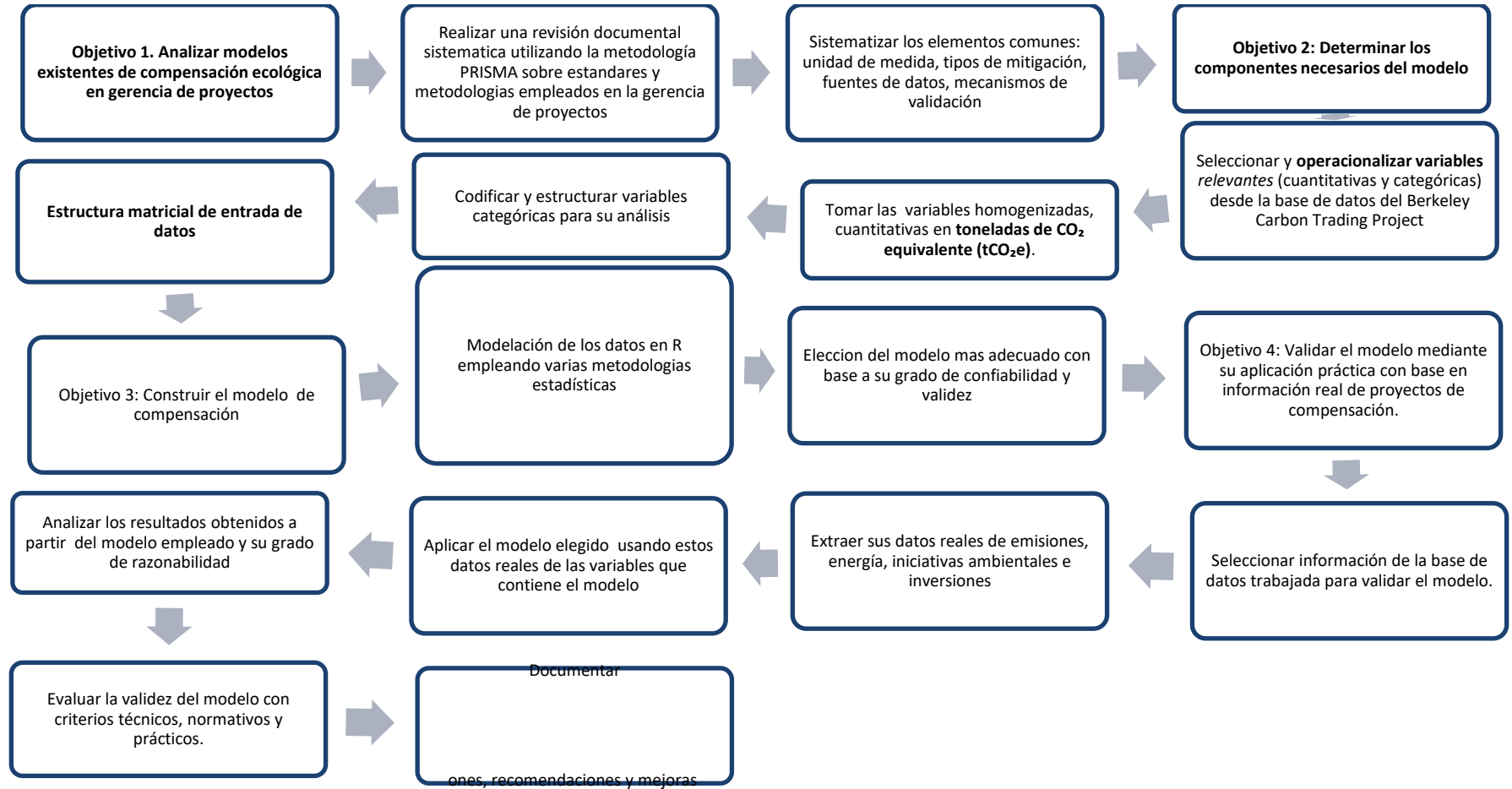
En primera instancia, se analizaron las variables cuantitativas como créditos emitidos, retirados, disponibles, capacidad total y fondo de reserva, homogeneizadas en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) para facilitar su comparación y establecer relaciones proporcionales. Con estas métricas se formularon funciones de cálculo que estiman la capacidad compensatoria efectiva de cada proyecto frente a las emisiones generadas.

Posteriormente, se incorporaron variables categóricas tipo de proyecto, país, mecanismo de mitigación (reducción o eliminación), certificaciones de sostenibilidad y registro voluntario, codificadas y empleadas como criterios de segmentación y clasificación en el modelo. Esto permitió una evaluación multicriterio que abarca tanto el volumen de emisiones mitigadas como la calidad, la trazabilidad y la confiabilidad ambiental de las iniciativas.

Finalmente, mediante el software R, se aplicó un análisis de conglomerados, identificando grupos homogéneos de proyectos con características técnicas y categóricas similares, lo que fortalece la validez y la aplicabilidad del modelo.

Figura 2

Metodología para el desarrollo de los objetivos



Nota. Elaboración propia.

3.12 Modelo conceptual de la investigación

El modelo conceptual de esta investigación se sustenta en la articulación integrada de tres dimensiones fundamentales: la gobernanza de proyectos, la analítica predictiva y la responsabilidad bioética. A diferencia de los enfoques convencionales que abordan la sostenibilidad como un elemento accesorio o externo al ciclo de vida del proyecto, el modelo la incorpora como un componente transversal, operativo y susceptible de verificación, alineado con los procesos de decisión gerencial y los mecanismos de control del desempeño.

Desde el punto de vista estructural, el modelo conceptual se organiza en torno a una función de transferencia que vincula los impactos antropogénicos derivados de la ejecución de un proyecto con la cuantía de compensación ecológica requerida. Esta relación se expresa mediante un esquema analítico que transforma información técnica, geográfica y metodológica como el tipo de proyecto, la localización y el estándar de mercado aplicable en una estimación cuantificable del impacto ambiental. El procesamiento de estas variables se apoya en un enfoque de regularización estadística que permite filtrar el ruido informacional, estabilizar las estimaciones y preservar únicamente los factores con incidencia significativa sobre la variable objetivo, definida como la compensación expresada en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

El modelo conceptual trasciende su dimensión matemática al integrarse en un marco de gobernanza sustentado en múltiples paradigmas epistemológicos y operativos. Desde una perspectiva pospositivista, se asume que el impacto ambiental constituye una realidad empírica susceptible de medición y análisis cuantitativo, aun reconociendo la existencia de una

incertidumbre inherente a los sistemas complejos. Desde un enfoque pragmático, el modelo se orienta a resolver el vacío operativo identificado en los estándares tradicionales de gerencia de proyectos, al traducir información ambiental en insumos concretos para la toma de decisiones ejecutables. De manera complementaria, incorpora un fundamento biocéntrico y bioético, al reconocer el valor intrínseco de los sistemas naturales afectados y exigir que la compensación ecológica responda a criterios de justicia ambiental y responsabilidad intergeneracional, más allá de su tratamiento financiero.

En términos de gobernanza, el modelo redefine la noción de éxito del proyecto al integrarla con el principio de resultado triple, articulando desempeño económico, ambiental y social. En la fase de planeación, el gerente de proyectos utiliza el modelo conceptual como una herramienta de soporte para anticipar la magnitud de la compensación requerida, evaluar la coherencia ética y financiera de las estrategias de mitigación y establecer mecanismos de seguimiento basados en métricas objetivas y auditables de CO₂eq. De este modo, el modelo conceptual actúa como un puente entre la analítica predictiva y la gobernanza responsable, fortaleciendo la trazabilidad, la transparencia y la legitimidad de las decisiones adoptadas a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

3.13 Técnica de análisis de datos

La técnica de análisis de datos adoptada en esta investigación se enmarca en el aprendizaje automático supervisado, mediante el uso de enfoques de regresión penalizada y métodos de ensamblaje, con el propósito de modelar la relación funcional entre las variables explicativas del proyecto y la cuantía de la compensación ecológica expresada en dióxido de carbono equivalente (CO_2eq). Desde una perspectiva analítica, el objetivo central consiste en la construcción de una función de transferencia parsimoniosa, capaz de capturar la estructura subyacente de los datos sin incurrir en sobreajuste ni pérdida de interpretabilidad.

El proceso analítico se inició con un análisis exploratorio de datos, orientado a examinar la distribución, dispersión y comportamiento estadístico de los 3.897 registros provenientes del Berkeley Carbon Trading Project. Esta fase permitió identificar patrones generales, niveles de variabilidad y la presencia de valores atípicos en las principales variables relacionadas con emisiones y créditos de carbono. Asimismo, se emplearon medidas de asociación lineal, como el coeficiente de correlación de Pearson, con el fin de reconocer preliminarmente aquellas variables con mayor vinculación estadística respecto a la cuantía de compensación, sin que este análisis inicial condicionara la selección final de predictores.

El núcleo del análisis se desarrolló mediante un enfoque de regularización estadística, seleccionado por su idoneidad para contextos caracterizados por alta dimensionalidad y multicolinealidad. Este método permitió abordar simultáneamente la necesidad de reducir la complejidad estructural del modelo y garantizar la estabilidad de las estimaciones. A través de la penalización aplicada sobre los coeficientes, se logró descartar variables redundantes y preservar únicamente aquellas con incidencia significativa sobre la variable dependiente, resolviendo de

manera eficiente el problema asociado a la presencia de un elevado número de predictores iniciales. De forma complementaria, el control de la multicolinealidad permitió estabilizar las estimaciones en escenarios donde variables como el tipo de proyecto, la metodología y el estándar de certificación presentan solapamientos estructurales frecuentes.

Como mecanismo de contraste metodológico, se implementó un enfoque de ensamblaje basado en múltiples árboles de decisión, el cual permitió capturar posibles relaciones no lineales y efectos jerárquicos presentes en los datos. Este procedimiento no se concibió como un sustituto del enfoque principal, sino como un referente comparativo para evaluar diferencias en capacidad predictiva, robustez y nivel de complejidad estructural, particularmente desde la perspectiva de la gobernanza de proyectos.

La evaluación del desempeño de las técnicas analíticas se llevó a cabo mediante un protocolo de validación cruzada, empleando métricas estandarizadas ampliamente aceptadas en la modelación predictiva. Entre estas se consideraron el coeficiente de determinación ajustado (R^2), como medida de capacidad explicativa; el error cuadrático medio (RMSE), para cuantificar la precisión de las estimaciones en unidades de CO₂eq; y un criterio de parsimonia, orientado a valorar el equilibrio entre el poder predictivo alcanzado y la simplicidad estructural del modelo. Este conjunto de métricas permitió evaluar de manera integral la idoneidad del enfoque analítico para su aplicación en escenarios reales de toma de decisiones y gobernanza ambiental.

3.14 Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales se incorporó como una técnica de aprendizaje no supervisado, con el objetivo de explorar la estructura latente de los datos, reducir la redundancia

informativa y evaluar la magnitud de la multicolinealidad presente en los registros del Berkeley Carbon Trading Project. Mediante esta técnica, el conjunto original de variables correlacionadas se transforma en un nuevo espacio de variables ortogonales componentes principales que concentran la mayor proporción de varianza explicada.

Desde una perspectiva aplicada a la gobernanza de proyectos, el ACP resulta especialmente pertinente en contextos donde variables como la metodología, el tipo de proyecto y el estándar de registro presentan solapamientos estructurales. El análisis permitió constatar que un número reducido de componentes concentra una proporción mayoritaria de la varianza total del sistema, lo que evidencia la existencia de factores subyacentes comunes que condicionan la cuantía de la compensación expresada en CO₂ equivalente (CO₂eq). Esta reducción dimensional facilita una comprensión sintética de los determinantes estructurales del fenómeno, sin alterar la información original.

Para garantizar la validez técnica del ACP, el procedimiento incluyó la normalización previa de las variables, evitando que diferencias de escala influyeran de manera desproporcionada en la formación de los componentes. La selección de los componentes retenidos se apoyó en criterios estadísticos consolidados, tales como la magnitud de los autovalores y el análisis del gráfico de sedimentación, así como en la evaluación de la varianza acumulada, con el fin de asegurar que la simplificación del espacio de variables no implicara una pérdida significativa de información relevante para la toma de decisiones.

3.15 Técnicas e instrumentos de investigación.

Investigación documental.

La investigación utiliza la técnica documental, entendida como el proceso sistemático de selección, análisis e interpretación de información secundaria proveniente de registros certificados. La fuente principal de datos cuantitativos es la base del Berkeley Carbon Trading Project (BCTP), un repositorio estructurado y verificado que consolida las transacciones de los registros de Verra, Gold Standard, ACR y CAR. Dado su carácter ex post facto, los datos no son de campo, sino documentales e históricos, lo que exige una depuración y homologación rigurosa del corpus para garantizar su trazabilidad y validez.

En paralelo, la validación conceptual se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica sobre compensación ecológica, bioética y mercados de carbono (Lee & Mayer, 2020), complementada con el análisis comparativo de marcos normativos internacionales (PMI, IPMA, PRINCE2, ISO 21500 y P5 de GPM), lo que permitió identificar la brecha disciplinar y operacionalizar las variables del modelo (Dibello et al., 2024).

Software empleado

Se utilizó el software R como principal herramienta para el tratamiento estadístico de los datos. Según (Contento, 2020), R es uno de los entornos de análisis cuantitativo más potentes y versátiles. Su elección se justifica por ser un sistema de código abierto que permite implementar de forma avanzada el modelo Elastic Net mediante la librería glmnet, aplicando las penalizaciones L1 (Lasso) y L2 (Ridge) para la selección y estabilización de variables. Además, R facilita la comparación algorítmica (Regresión Múltiple, Random Forest) y la validación cruzada para optimizar hiperparámetros, asegurando un modelo robusto, replicable e interpretativamente sólido, conforme al rigor científico exigido en esta investigación.

Base de datos empleada

La base de datos utilizada proviene del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley (K. Haya et al., 2025), que consolida proyectos de compensación de carbono y registros de créditos emitidos y retirados de los principales estándares voluntarios: ACR, CAR, Gold Standard y Verra (VCS). Esta fuente, reconocida y de acceso público, ofrece la mayor cobertura global del mercado voluntario y cuenta con respaldo institucional y verificación independiente.

Su carácter documental y ex post facto garantiza la validez externa y la trazabilidad del análisis, al reflejar la dinámica real de las transacciones de CO₂eq sin manipulación experimental. El uso de esta base permite que los coeficientes del modelo Elastic Net capturen interdependencias financieras y ecológicas efectivas, asegurando resultados replicables, generalizables y metodológicamente robustos. En suma, el BCTP fue seleccionado no solo por la amplitud de sus datos, sino también por su calidad como corpus estructurado y representativo del universo de la compensación ecológica.

Pasos para la obtención de datos de la base

Para esta fase se realizó una búsqueda en la web de organizaciones que publican bases de datos sobre proyectos de compensación ecológica. Si bien se identificaron varias opciones, la mayoría eran repositorios de acceso restringido o pago. Finalmente, se seleccionó el Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, por ser uno de los repositorios más completos y de acceso abierto, que integra información de los cuatro registros voluntarios principales (ACR, CAR, Gold Standard y Verra) y cuenta con variables pertinentes para la construcción del modelo de compensación. Su enfoque académico e interdisciplinario respalda su validez como fuente primaria para esta investigación.

Delimitación de la búsqueda.

Identificación de la versión correcta: En el apartado *Downloads* del sitio web se seleccionó la base con el sufijo v2025-4, correspondiente a datos actualizados hasta abril de 2025. Se verificó que se incluían variables clave como créditos emitidos, retirados y restantes, capacidad total, fondo de depósitos, nombre, tipo y país del proyecto, fecha de registro y certificación de sostenibilidad, garantizando así su cobertura internacional a partir de los cuatro registros principales.

Descarga y revisión de la base.

Una vez localizada la base v2025-04, se procedió a descargarla y analizarla en el apartado *Data Dictionary*, donde se identificaron las definiciones y unidades de las variables. Estas fueron comparadas con los estándares del mercado de compensaciones ecológicas, lo que confirma la pertinencia y validez del conjunto de datos, respaldado académicamente por la Universidad de California, Berkeley – Goldman School of Public Policy.

3.16 Paradigma de investigación

Fundamentación Paradigmática del Modelo de Compensación Ecológica: Un Enfoque Tripartito para la Gobernanza de Proyectos

La investigación desarrolla un modelo de compensación ecológica como respuesta al deterioro ambiental derivado de la gobernanza de proyectos, cuya fragilidad epistemológica radica en tratar la sostenibilidad como una simple externalidad (Økland, 2015). Para superar esta brecha disciplinar, se adopta un marco teórico que, siguiendo a Kuhn citado por (Ramos, 2015), se entiende como un sistema de ideas interrelacionadas que orienta la comprensión de la realidad y del conocimiento. El modelo se fundamenta en la integración metodológica y ontológica de tres paradigmas complementarios.

1. Paradigma Pragmático (Núcleo Metodológico Principal)

El pragmatismo constituye el paradigma principal del estudio, proporcionando el marco flexible para la investigación empírica y aplicada (Kaushik & Walsh, 2019). Su propósito no se limita a verdades absolutas, sino a plantear verdades provisionales que se validan en la resolución de problemas de un entorno real. La ontología pragmática se define como procesual, relacional, recursiva y antidualista (Tywoniak et al., 2021), concibiendo a los individuos y estructuras como resultados de relaciones dinámicas.

Contribución: Permite el uso del razonamiento abductivo para la creación de datos y teorías (Kaushik & Walsh, 2019) y facilita la integración de métodos (como el análisis de clúster y las métricas) en función de su utilidad operativa y de su flexibilidad contextual, buscando soluciones concretas para la gestión de la compensación ecológica.

2. Paradigma Pospositivista (Fundamento Epistemológico Subordinado)

El pospositivismo se adopta como paradigma subordinado, al ofrecer el fundamento epistemológico necesario para el análisis de variables cuantitativas.

Contribución: parte del reconocimiento de una realidad externa mensurable, evaluable mediante indicadores objetivos y verificables, como las emisiones de GEI, la eficiencia energética y los créditos de carbono emitidos o retirados. Este enfoque fomenta una aproximación científica rigurosa y posibilita la cuantificación de la huella de carbono, esencial para estimar la compensación. No obstante, asume que toda comprensión de la realidad está condicionada por la percepción y la metodología empleada (Kaushik & Walsh, 2019).

3. Paradigma Biocéntrico/Bioético (Eje Ético Transversal)

El paradigma bioético actúa como eje transversal del modelo, al reconocer que la compensación ecológica trasciende su dimensión técnica y financiera para convertirse en un compromiso ético con la vida.

Contribución: siguiendo la visión de Potter (1971) citada por & Spordeler (2021), la bioética integra el conocimiento biológico con los principios éticos que orientan la conducta humana, en función de la supervivencia y calidad de vida del ecosistema.

Esta perspectiva, ampliada por Morín (2011), y Martínez (2016), incorpora la responsabilidad intergeneracional, la justicia ambiental y el cuidado de los ecosistemas como criterios fundamentales en la toma de decisiones. Así, complementa el paradigma pragmático al exigir que las soluciones operativas se validen en términos de equidad ecológica, transparencia y altruismo (Camargo et al., 2012).

Conclusión Teórica: La Compensación como Función Transversal

La articulación de los tres enfoques la objetividad métrica del pospositivismo, la aplicabilidad operativa del pragmatismo y la justicia ecológica de la bioética posibilita el desarrollo de una propuesta teórica innovadora. Esta concibe la compensación ecológica no como una simple externalidad regulatoria, sino como una función transversal y ontológica en la gobernanza ambiental de los proyectos.

El estudio abre así un nuevo programa de investigación en el ámbito de la gerencia de proyectos sostenibles, orientado a promover un cambio significativo en la práctica profesional, donde las decisiones estratégicas se sustenten en criterios técnicamente sólidos, contextualmente aplicables y guiados por una conciencia bioética comprometida con la vida y el entorno.

3.17 Naturaleza de la investigación

La investigación se enmarca en un diseño correlacional-predictivo, acorde con la complejidad de la problemática, el objetivo central y la naturaleza econométrica de la metodología.

1. Naturaleza multidimensional de la problemática:

La compensación ecológica en la gobernanza de proyectos es un fenómeno multivariable y relacional, que trasciende la simple descripción de la huella de carbono. El propósito es establecer un mecanismo predictivo de compensación que analice cómo diversos factores interactúan y condicionan simultáneamente la capacidad de mitigación y la dinámica del mercado de créditos de carbono.

Se analizan constructos financieros y ambientales como créditos emitidos y retirados, depósitos de reserva, CO₂eq y tipo de mitigación que, por su naturaleza, no son manipulables

experimentalmente, sino observables en su interdependencia en el ecosistema del mercado de carbono (Méndez & Perugache, 2012).

2. Objetivo de establecer una función de transferencia predictiva

El propósito de desarrollar un modelo cuantitativo que relacione las variables identificadas constituye la esencia del diseño correlacional-predictivo. Más que detectar asociaciones, busca construir una función de transferencia capaz de estimar el valor de la compensación ecológica a partir de un conjunto de predictores.

Mecanismo metodológico: Las técnicas empleadas Elastic Net y Random Forest están orientadas a identificar la fuerza y la dirección de las asociaciones (fase correlacional) y a generar un modelo predictivo estable y verificable (fase predictiva).

Mecanismo metodológico: Las técnicas empleadas Elastic Net y Random Forest están orientadas a identificar la fuerza y la dirección de las asociaciones (fase correlacional) y a generar un modelo predictivo robusto que minimice el error de estimación (reducción del MSE) y optimice el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) en la predicción de la compensación ecológica.

3. Rigor Algorítmico y Modelado Estructural

La elección del modelo Elastic Net constituye el argumento técnico más sólido del enfoque correlacional-predictivo.

Gestión de la multicolinealidad: al combinar las penalizaciones L1 (Lasso) y L2 (Ridge), este modelo maneja la complejidad de las interrelaciones entre variables por ejemplo, entre los créditos emitidos y los créditos restantes sin violar el supuesto de independencia, generando coeficientes sesgados pero estables, lo que garantiza una estimación robusta y parsimoniosa.

Selección de Variables: El componente L1 realiza una selección automatizada de variables (imponiendo coeficientes cero a los predictores irrelevantes), un proceso netamente correlacional para identificar qué variables mejor contribuyen a la predicción del monto de compensación.

En síntesis, la investigación se clasifica como correlacional-predictiva porque busca determinar el grado y la forma de asociación entre las variables del mercado de carbono con el propósito de generar una función de estimación confiable. La robustez de dichas correlaciones se valida mediante la precisión algorítmica del modelo Elastic Net, que proporciona una solución técnica al déficit epistemológico de los estándares tradicionales de gobernanza de proyectos.

3.18 Herramienta metodológica para la revisión de literatura

Para asegurar la rigurosidad, la trazabilidad y la transparencia en la revisión teórica y normativa que sustenta el modelo de compensación ecológica, se aplicó la guía PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Esta metodología estructuró de forma sistemática la búsqueda, selección, evaluación y síntesis de la literatura científica y técnica relevante, integrando componentes normativos, ambientales y de gobernanza.

El procedimiento comprendió las siguientes etapas:

1. Identificación: Definición de palabras clave (“compensación ecológica”, “créditos de carbono”, “ISO 14064”, “proyectos sostenibles”) y búsqueda en bases de datos académicas (Scopus, ScienceDirect) y en repositorios institucionales.
2. Selección: Aplicación de criterios de inclusión (últimos 10 años, acceso completo, pertinencia temática y vínculo con marcos normativos o metodológicos).
3. Evaluación: Análisis de la calidad y la aplicabilidad de las fuentes según su nivel de evidencia y su relevancia contextual.

4. Síntesis: Organización temática en torno a los estándares internacionales, las metodologías de gestión sostenible y los mecanismos de compensación ambiental.
5. Visualización: Elaboración del diagrama de flujo PRISMA, que muestra el proceso desde la identificación hasta la inclusión final de los estudios.

El uso de PRISMA fortaleció la validez conceptual del modelo, garantizando que su diseño se sustentara en evidencia científica y en buenas prácticas internacionales.

3.19 Participantes:

La Tabla 14 presenta los tipos de participantes involucrados en el desarrollo de la investigación, clasificados según su función y su nivel de intervención. En primer lugar, se identifican los participantes indirectos, representados por los proyectos de compensación registrados en sistemas voluntarios internacionales, cuya información técnica constituye la base empírica del modelo. En segundo lugar, los participantes institucionales son organizaciones de sectores productivos que publican informes de sostenibilidad y aportan datos para la validación del modelo. La investigadora actúa como participante activa en la conceptualización, el diseño y la validación del instrumento, mientras que el asesor técnico y metodológico garantiza la coherencia científica y normativa del proceso. Esta clasificación evidencia la diversidad de fuentes y actores que sustentan una investigación documental-aplicada.

Participantes de la investigación

Tabla 13

Participantes en el desarrollo del modelo de compensación ecológica en la gobernanza de proyectos.

Tipo de participante	Descripción	Función en la investigación	Justificación
Participantes indirectos	Proyectos de compensación listados en la base de datos del Berkeley Carbon Trading Project (Verra, Gold Standard, ACR, CAR).	Aportan los datos técnicos (créditos, tipo, país, certificación) utilizados para construir y validar el modelo.	Son la principal fuente empírica y técnica de datos del estudio.
Participantes institucionales (fuentes secundarias)	Sectores económicos (hidrocarburos, minería, energía) que publican informes de sostenibilidad conforme a estándares como GRI o CDP.	Proveen datos reales sobre emisiones y desempeño ambiental para aplicar el modelo en un contexto práctico.	Permiten evaluar la funcionalidad del modelo con información sectorial real.
Participante investigador	La investigadora autora de la tesis.	Diseña, sistematiza, aplica y valida el modelo metodológico de compensación ecológica.	Ejecuta la labor científica y técnica en el marco metodológico no experimental y aplicado.
Asesor técnico y metodológico	Especialistas que brindan orientación experta durante el desarrollo de la investigación.	Apoyan en la construcción del modelo, la validación de procedimientos y la rigurosidad técnica y metodológica del estudio.	Su participación garantiza que el modelo cumpla con estándares científicos, normativos y aplicables.

Nota. . Elaboración propia.

4 Capítulo Resultados

4.1 Caracterización de la muestra

La fase analítica de la presente investigación se fundamenta en una muestra final depurada de 3.897 registros, obtenida a partir de la base de datos del Berkeley Carbon Trading Project (BCTP), la cual consolida información de proyectos certificados en los principales mercados voluntarios de carbono a nivel global. La caracterización de esta muestra permite comprender la heterogeneidad estructural, geográfica y sectorial de las variables que inciden en la determinación de la compensación ecológica expresada en dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), así como justificar las decisiones metodológicas adoptadas en el proceso de modelación.

4.1.1 Distribución por estándares de registro

La muestra presenta una representatividad diversa al integrar proyectos certificados bajo los cuatro estándares voluntarios de mayor reconocimiento internacional, cada uno con enfoques metodológicos y regulatorios diferenciados. El Verified Carbon Standard (VCS) concentra la mayor proporción de registros, incorporando proyectos de amplio espectro tecnológico e industrial y constituyéndose como el marco predominante en los mercados voluntarios. El Gold Standard aporta información asociada a proyectos con un énfasis marcado en sostenibilidad integral y co-beneficios sociales, mientras que el American Carbon Registry (ACR) y el Climate Action Reserve (CAR) contribuyen con registros caracterizados por metodologías específicas y una fuerte presencia en contextos regulatorios norteamericanos, especialmente en sectores vinculados a la gestión de tierras y emisiones sectoriales reguladas. Esta diversidad fortalece la

validez externa del análisis y permite evaluar la compensación ecológica en distintos marcos de gobernanza ambiental.

4.1.2 Representatividad geográfica y sectorial

Desde el punto de vista geográfico, la muestra posee cobertura internacional, lo que permite capturar variaciones en los niveles de compensación asociadas a diferentes regiones, jurisdicciones y contextos biofísicos. Esta amplitud espacial resulta particularmente relevante para analizar la influencia de factores territoriales y regulatorios en la cuantificación del CO₂eq. En términos sectoriales, los registros se concentran principalmente en proyectos de energías renovables, orientados a la mitigación mediante transición energética; en el sector AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use), que constituye un componente crítico de la compensación ecológica e incluye proyectos de reforestación, conservación y REDD+; y en iniciativas de gestión de residuos y eficiencia industrial, enfocadas en la reducción directa de emisiones y la optimización de procesos productivos. Esta distribución sectorial permite evaluar patrones diferenciados de mitigación y compensación dentro del mercado voluntario de carbono.

4.1.3 Comportamiento de las variables predictoras

El análisis descriptivo inicial evidenció una alta dimensionalidad del conjunto de datos, conformado por 232 variables predictoras, que integran descriptores cuantitativos y categóricos relacionados con características técnicas, metodológicas, temporales y geográficas de los proyectos. Se observó una variabilidad significativa en la cuantía de créditos emitidos y en la capacidad de mitigación reportada, así como la presencia de relaciones de dependencia y multicolinealidad entre variables estructurales, tales como el año de inicio del proyecto, el

volumen de emisiones evitadas y el tipo de metodología aplicada. Estas características justifican el uso de técnicas de regularización estadística para gestionar la dispersión, estabilizar las estimaciones y reducir la complejidad del espacio de variables.

4.1.4 Tipo de muestra y criterios de inclusión

La muestra utilizada es de carácter no probabilístico e intencional, estructurada en dos niveles analíticos. El primer nivel corresponde a la selección de 3.897 proyectos internacionales de compensación de carbono, extraídos del BCTP con base en criterios de disponibilidad de información y representatividad técnica. El segundo nivel comprende los registros específicos por proyecto contenidos en la base de datos, que constituyen las unidades empíricas de análisis para la modelación predictiva.

Los criterios de inclusión considerados fueron el acceso público a la información, la disponibilidad de datos cuantificables de emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en CO₂eq, y la certificación bajo estándares internacionales reconocidos (VCS, Gold Standard, ACR y CAR). La selección de esta muestra se justifica por la trazabilidad técnica, consistencia metodológica y reconocimiento internacional de la fuente, condiciones necesarias para garantizar la integridad del análisis y la aplicación de modelos predictivos robustos en el contexto de la gobernanza de proyectos.

4.2 Objetivo específico 1

Para dar respuesta al primer objetivo de esta investigación “Analizar los modelos de compensación ecológica desarrollados en las metodologías y estándares utilizados en gerencia de proyectos” se obtuvieron los siguientes resultados que se sintetizan en la tabla 14

Tabla 14

Comparativo entre el tratamiento de la sostenibilidad y compensación ecológica en distintos estándares

Estándar / metodología	Enfoque de sostenibilidad	Elementos de compensación ecológica	Fortalezas	Limitaciones
P5 (GPM)	Integra los pilares económicos, sociales y ambientales mediante la triple línea base. Utiliza indicadores de la ISO y de la GRI; incorpora los Diez Principios del Pacto Mundial.	Analiza los impactos en transporte, energía, agua y residuos; emplea registros de riesgo y sistemas de puntuación para valorar y mitigar dichos impactos; exige considerar la sostenibilidad en todas las fases del proyecto.	Modelo integral: cuantificación de impactos y riesgos; permite priorizar acciones y establecer medidas compensatorias.	Requiere madurez organizacional y conocimiento de los estándares internacionales.
PMI/PMBOK	La sostenibilidad se menciona de manera general; la “Extensión a la Construcción” incorpora un área ambiental para proyectos de obra. PMBOK7 incluye principios éticos y de valor.	Se limita a procesos de identificación y control ambiental en proyectos de construcción; no ofrece un modelo universal de compensación.	Gran difusión y adopción globales; flexibilidad para distintos sectores; guía de memorias de sostenibilidad como complemento.	Falta de indicadores específicos y de metodología de compensación; la sostenibilidad no es un principio formal ni un área de conocimiento transversal.
IPMA (ICB4)	Considera la sostenibilidad como parte de la estrategia, del cumplimiento regulatorio y de la cultura. Destaca la importancia de gestionar las expectativas de los stakeholders en materia de sostenibilidad.	No establece procedimientos concretos para medir ni compensar los impactos; aborda la sostenibilidad a nivel de competencias.	Fomenta el desarrollo de capacidades individuales y organizacionales; reconoce la relevancia de la sostenibilidad en la misión empresarial.	Carencia de métricas o de herramientas de compensación; asigna la responsabilidad al director del proyecto, sin guías específicas.

Estándar / metodología	Enfoque de sostenibilidad	Elementos de compensación ecológica	Fortalezas	Limitaciones
PRINCE2	Introduce la sostenibilidad como principio emergente; exige justificar los objetivos ambientales y definir las tolerancias ecológicas.	No aborda metodologías de compensación; se centra en la viabilidad del negocio y en el control de riesgos generales.	Claridad en la estructura de principios y procesos; énfasis en la justificación del proyecto y en la gestión de riesgos.	Falta de integración de criterios ambientales en su núcleo; ausencia de métricas y de políticas de compensación.
ISO 21500	Reconoce que el entorno influye en el desempeño y que deben evaluarse los impactos en los grupos de interés; aboga por la responsabilidad del equipo del proyecto para gestionar la sostenibilidad.	No ofrece métodos de evaluación ni de compensación; remite a la organización para adaptar la sostenibilidad a su estrategia y cultura.		

Nota. . Elaboración propia.

La Tabla 14 evidencia la heterogeneidad en la integración de la sostenibilidad y la compensación ecológica dentro de los principales estándares de gestión de proyectos

Mientras que el P5 y su metodología PRiSM constituyen un modelo robusto orientado a medir y compensar impactos, otros marcos como PMI/PMBOK, IPMA, PRINCE2 e ISO 21500 abordan estos aspectos de forma general o marginal, lo que genera un vacío metodológico en la valoración y gestión de la sostenibilidad.

Esta brecha revela la necesidad de herramientas con métricas concretas (CO₂, agua, residuos) y criterios de valoración que orienten decisiones sobre reducción, mitigación, restauración o compensación. En este sentido, P5 sobresale por ofrecer un sistema estructurado, con metodologías de puntuación y subcategorías específicas para el análisis de impactos.

El rol del director de proyectos es clave, aunque su nivel de responsabilidad y formación varía: mientras que PMI e ISO presentan enfoques generales, P5 incorpora la sostenibilidad en

cada entregable y proceso, articulando su aplicación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y certificaciones internacionales como LEED, GRI y el Pacto Mundial de la ONU.

En síntesis, el P5 de GPM se consolida como el único estándar que integra la sostenibilidad de forma transversal y medible en todas las fases del proyecto, mientras que los demás marcos reconocen su importancia sin establecer procedimientos formales para su medición o compensación, lo que demanda su complementación mediante metodologías de análisis del ciclo de vida y huella de carbono.

4.3 Objetivo específico 2

Los hallazgos correspondientes al Objetivo Específico 2, orientado a *“determinar los elementos esenciales para el desarrollo del modelo de compensación ecológica, incluyendo las variables, sus métricas y las técnicas de modelado para su desarrollo”*, arrojan un resultado de alta relevancia teórica y metodológica que merece especial atención.

Variables y datos de partida

Estas variables obtienen su información de la Base de Datos de Compensaciones del Registro Voluntario v2025-04, del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, de la Universidad de California, Berkeley.

Variables cuantitativas (expresadas en toneladas de CO₂ equivalente):

- Créditos emitidos: número total de créditos certificados desde el inicio del proyecto.
- Créditos retirados: créditos ya utilizados (no disponibles para nuevas transacciones).
- Créditos restantes: diferencia entre créditos emitidos y retirados; representan el potencial de compensación disponible.

- Capacidad total del proyecto: proyección de emisiones que el proyecto puede mitigar durante su vida útil.
- Depósitos de reserva (buffer pool): créditos bloqueados para contingencias, excluidos del cómputo directo.

Variables categóricas

- Nombre del proyecto: facilita la trazabilidad.
- Registro voluntario: ACR, CAR, Gold Standard o Verra; indica el estándar técnico aplicable.
- Alcance: sector o ámbito (forestal, energético, agrícola, residuos).
- Tipo de proyecto: clasificación funcional (mitigación, captura, eficiencia, sustitución tecnológica).
- Reducción/eliminación: mecanismo dominante (reducción de emisiones, eliminación permanente, eliminación de larga duración o mixta).
- País: ubicación geográfica; permite analizar los efectos regulatorios y de mercado.
- Certificaciones de sostenibilidad: presencia/ausencia de sellos adicionales (p. ej., SDVISTa, CCB).
- Fecha de registro: antigüedad del proyecto; útil para identificar tendencias temporales.

Homogeneización:

Las variables cuantitativas se convierten en **tCO₂e** para compararlas y sumarlas; las categóricas se codifican en números (p. ej., 1–4 para reducción/eliminación, 1–n para países) para procesarlas en R.

Métricas de evaluación

Para comparar modelos y medir la capacidad explicativa de cada variable se emplean distintos indicadores:

- R^2 y R^2 ajustado en modelos de regresión lineal para determinar la proporción de la variabilidad explicada.
- Criterios de información, como AIC y BIC, para seleccionar el mejor subconjunto de variables en regresiones stepwise.
- Error cuadrático medio (MSE) y R^2 out-of-bag en Random Forest, que miden la capacidad predictiva del bosque de decisiones.
- Raíz del MSE (RMSE) en Elastic Net mediante validación cruzada, útil para comparar con otras metodologías.
- Tasa de esparsidad (porcentaje de variables con coeficientes distintos de cero) para evaluar la parsimonia del modelo Elastic Net.

Modelos comparados:

- **Regresión lineal:** permite estimar los efectos lineales de variables numéricas y categóricas.
- **Random Forest:** método de *machine learning* basado en árboles de decisión. Es eficaz para capturar relaciones no lineales e interacciones complejas entre variables.

- **Elastic Net:** combina penalizaciones L1 (Lasso) y L2 (Ridge) para seleccionar variables y reducir la varianza.

En el amplio y complejo ámbito de la sostenibilidad aplicada a la gobernanza de proyectos, no existe una fórmula única para la compensación ecológica. En su lugar, surge un modelo integral resultado de la interacción entre datos, variables y métodos analíticos que, en conjunto, constituyen la base de un enfoque científicamente válido. Con el Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley como referencia central, se seleccionaron variables cuantitativas clave créditos emitidos, retirados y restantes, capacidad total y fondo de reserva, las cuales se homogeneizaron en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) para garantizar la comparabilidad y consistencia del análisis.

Este proceso buscó facilitar la comparación y síntesis de la información, garantizando la coherencia entre las distintas dimensiones del análisis. No obstante, el modelo no se limitó al tratamiento numérico: se incorporaron variables categóricas como el *tipo de proyecto*, *el país de origen*, *el registro voluntario* y *el mecanismo de reducción o eliminación*, las cuales se *codificaron* numéricamente para permitir su integración en los procedimientos estadísticos posteriores.

Con esta base estructurada, se procedió a explorar tres enfoques analíticos complementarios, cada uno con un aporte metodológico particular: la Regresión Lineal Múltiple, de alta interpretabilidad pero sensible a la multicolinealidad; el Random Forest, capaz de captar relaciones no lineales y complejas a costa de menor transparencia interpretativa; y finalmente, el Elastic Net, que al combinar las penalizaciones *Lasso (L1)* y *Ridge (L2)*, permitió una selección automática de variables relevantes y la estabilización de los coeficientes, alcanzando un equilibrio óptimo entre precisión predictiva y simplicidad estructural.

Esta exploración metódica culminó en un proceso de validación cruzada, que confirmó la capacidad del modelo Elastic Net para retener únicamente las variables estadísticamente significativas. Con ello, se alcanzó un equilibrio óptimo entre precisión y parsimonia, evitando el sobreajuste y garantizando la estabilidad predictiva. Todo el proceso desde la identificación y homogeneización de las variables hasta la aplicación de métricas de desempeño como el coeficiente de determinación ajustado (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y la tasa de esparsidad constituyó el núcleo de un modelo de compensación ecológica robusto y replicable. En consecuencia, este modelo se erige como una herramienta técnica de apoyo a la gobernanza de proyectos sostenibles, ofreciendo un marco cuantitativo y verificable que orienta la gestión hacia un futuro más responsable con el medio ambiente.

4.4 Objetivo específico 3

Construir un modelo de compensación ecológica en la gobernanza de proyectos

4.4.1 Construcción del Modelo de Compensación Ecológica para la Gobernanza de Proyectos

Con base en la operacionalización del segundo objetivo de esta investigación, se definió como variable dependiente las reducciones de CO₂, coherentes con el propósito central del modelo orientado a la compensación ecológica. Dado su carácter numérico y cuantificable, se aplicaron diversas técnicas analíticas para comparar su desempeño y determinar el método más confiable y preciso para el modelado predictivo.

En primera instancia, se implementó la Regresión Lineal Múltiple, elegida por su capacidad para integrar simultáneamente variables numéricas y categóricas y proporcionar una

línea base de interpretación. Posteriormente, se aplicó el algoritmo de Machine Learning Random Forest, una técnica basada en árboles de decisión, útil para identificar relaciones no lineales y patrones complejos entre las variables. Finalmente, se desarrolló un modelo de regresión con regularización que incluyó las técnicas Lasso, Ridge y Elastic Net, destinadas a mejorar la estabilidad del modelo y mitigar los efectos de la multicolinealidad.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con cada una de las técnicas aplicadas durante el proceso de modelado y comparación estadística.

4.4.2 Modelo de Regresión

El modelo de regresión lineal se desarrolló utilizando la base de datos del Berkeley Carbon Trading Project (BCTP), que recopila información detallada sobre proyectos de compensación de carbono inscritos en los principales sistemas voluntarios internacionales: American Carbon Registry (ACR), Climate Action Reserve (CAR), Gold Standard y Verra (VCS). Esta fuente, reconocida por su cobertura global y rigor técnico, proporciona datos actualizados sobre créditos de carbono emitidos, retirados y disponibles, así como sobre depósitos de reserva y variables complementarias que permiten estimar la capacidad de mitigación de emisiones. La base analizada comprende 3.897 registros, correspondientes a proyectos distribuidos a nivel mundial, lo que garantiza la representatividad y validez empírica del modelo construido.

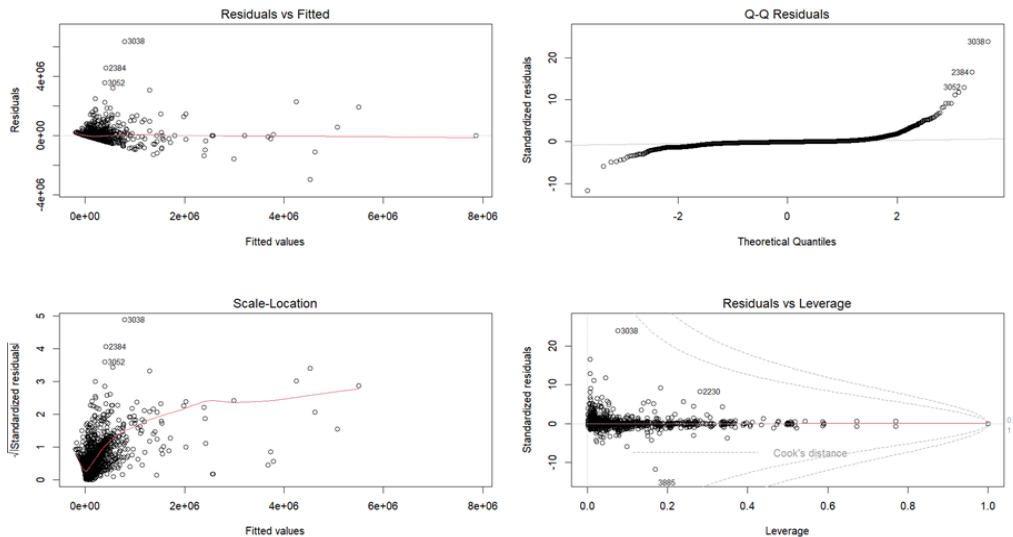
Las variables contenidas en la base de datos fueron analizadas por el programa R para generar un modelo de regresión que inicialmente arrojó la siguiente información luego de su procesamiento:

El modelo de regresión lineal múltiple presentó un error estándar residual de 277,700 en 3,682 grados de libertad, lo que indica una dispersión moderada entre los valores observados y los estimados. El coeficiente de determinación (R^2) alcanzó un valor de 0,5786, con un R^2 ajustado de 0,5541, lo que sugiere que aproximadamente el 55 % de la variabilidad en la compensación ecológica puede explicarse por el conjunto de variables incluidas en el modelo. La estadística F (23,62 con 214 y 3.682 grados de libertad) y un valor p inferior a $2,2e-16$ confirman la significancia global del modelo, evidenciando que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables predictoras y las reducciones de CO_2 .

La siguiente figura, evidencia gráficamente estos resultados.

Figura 3

Modelo de regresión



Nota. . Elaboración propia con base en el programa R

Error estándar residual: 277700 en 3682 grados de libertad

Múltiple R-cuadrado: 0.5786, Ajuste de R-cuadrado: 0.5541

F-Estadística: 23.62 en 214 y 3682 DF, p-valor: $< 2.2e-16$.

El modelo de regresión lineal múltiple mostró un error estándar residual de 277.700 con 3.682 grados de libertad. El R^2 de 0,5786 y el R^2 ajustado de 0,5541 indican que cerca del 55 % de la variabilidad en las reducciones de CO₂ se explica por las variables del modelo. La prueba F (23, 62; $p < 0,001$) confirma la significancia global. Sin embargo, los gráficos de diagnóstico evidencian valores atípicos y cierta heterocedasticidad, lo que sugiere la conveniencia de emplear modelos más robustos, como Random Forest o Elastic Net, para mejorar la estabilidad y la precisión de la predicción.

El error estándar residual

El error estándar residual de 277.700 con 3.682 grados de libertad representa, en promedio, la distancia entre los valores observados en la base de datos y los estimados por el modelo. Un valor elevado de este indicador sugiere que las predicciones se alejan de los datos utilizados para construir el modelo de compensación. Los grados de libertad reflejan la diferencia entre el total de observaciones y los parámetros estimados y sirven como medida del nivel de ajuste alcanzado. En términos generales, mientras menor sea el error estándar respecto a la escala de los datos, mayor será la precisión y la capacidad explicativa del modelo.

Múltiple R-cuadrado: 0.5786

El coeficiente de determinación (R^2) representa la proporción de la variabilidad de la variable dependiente que se explica por las variables independientes. En este caso, un valor de 0,5786 equivalente a cerca del 58 % indica que algo más de la mitad de la variación observada en los datos puede atribuirse al modelo, lo que evidencia una capacidad explicativa moderada y limita su confiabilidad.

Ajuste de R-cuadrado: 0.5541

El R^2 ajustado introduce una penalización al modelo al incorporar variables que reducen su consistencia y fiabilidad, por lo que su valor suele ser inferior al R^2 simple. Ante ello, se recomienda depurar los datos atípicos que afectan la estabilidad del modelo.

Con base en estos resultados, se aplicó el **criterio de información de Akaike (AIC)** para construir un nuevo modelo mediante el método paso a paso. Según Martínez et al. (2016), este criterio constituye una herramienta objetiva y sencilla para seleccionar el modelo que mejor se ajuste a los datos experimentales. El AIC, fundamentado en la teoría de la información, se expresa como:

$$\text{AIC} = -2 \log(L(\mathbf{b})) + 2K,$$

donde $\log(L(b))$ representa el logaritmo de la máxima verosimilitud empleada para estimar los parámetros del modelo y K corresponde al número de parámetros libres. Esta fórmula permite estimar la discrepancia entre el modelo propuesto y el proceso real que genera los datos observados, la cual suele ser desconocida o difícil de caracterizar directamente.

Tras evaluar los resultados del análisis de regresión y considerar el valor de R^2 obtenido, se procedió a identificar los **datos atípicos (outliers)** mediante el **criterio de información de Akaike (AIC)**, con el fin de mejorar la confiabilidad del modelo. Se detectó un total de 136 registros atípicos, que fueron excluidos de la base de datos. Posteriormente, la información fue procesada y sistematizada nuevamente mediante el mismo programa estadístico, aplicando el modelo de regresión.

4.4.2.1 Modelo de regresión con los datos depurados o Modelo Paso a Paso

Error estándar residual: **129.200** en **3.556 grados de libertad**.

R^2 múltiple: **0.7717** R^2 ajustado: **0.7586**.

Estadístico F: **58,93** en **204 y 3.556 DF**, con **$p < 2,2e-16$** .

conjunto, estos resultados reflejan un modelo con un menor margen de error y una mayor precisión.

El **R² múltiple (0.7717)** indica que el modelo explica aproximadamente el 77,2 % de la variabilidad de la variable dependiente, lo que muestra una mejora significativa tras la depuración de los datos atípicos. Esto refuerza la coherencia entre las variables y ofrece una mejor representación de la estructura subyacente de los datos.

Por su parte, el **R² ajustado (0.7586)** equivalente al **75,9 %** mantiene una proximidad con el R² simple, lo que confirma la validez explicativa del modelo sin incurrir en sobreajuste.

Finalmente, la **estadística F (58, 93)** y el **valor p < 2.2e-16** indican que el conjunto de variables independientes explica de forma significativa la variable dependiente. Esto confirma la **robustez estadística** y la **viabilidad predictiva** del modelo, evidenciando una mejora sustancial frente al modelo inicial, ahora más parsimonioso y confiable.

El modelo alcanza una **capacidad explicativa cercana al 76%** en la compensación de emisiones, lo que representa un alto y satisfactorio nivel de ajuste. Este resultado es especialmente relevante si se considera la **diversidad tecnológica y geográfica** de los proyectos analizados, lo que confirma la solidez del modelo para integrar contextos heterogéneos en una misma estructura predictiva.

Variables cuantitativas en el modelo

- Créditos emitidos: Coeficiente 0.15 ($p < 0.001$) → existe una relación positiva y significativa, lo que indica que, por cada crédito emitido, se incrementa, en promedio, la compensación ecológica. El beta estandarizado (0.67) confirma que esta es la variable continua con mayor influencia en el modelo.

- Créditos retirados: Coeficiente: -0.04 ($p < 0.001$) → muestra una relación negativa y estadísticamente significativa: un aumento de los créditos retirados se asocia con una disminución de la compensación total. Esto puede interpretarse como un efecto derivado del uso de reservas, que reduce la disponibilidad de créditos y, por tanto, el potencial compensatorio futuro.

Variables categóricas en el modelo

Tipo de proyecto

Tecnologías que generan efectivos altamente significativos y positivos sobre la compensación:

- HFC23_Destruction (fluoroformo o CHF_3 , un gas con un potencial de calentamiento global 12.000 veces superior al del CO_2) (coef. 7,25 millones, $p < 0,001$) → Constituye, con gran diferencia, la tecnología más influyente en términos de reducción.
- Generación de energía mediante gas natural (coef. 534.793, $p < 0.001$).
- Manejo sostenible de pastizales (coef. 765,681, $p < 0,001$).
- Destrucción de N_2O en ácido nítrico (coef. 318.121, $p = 0.004$).
- Detección y reparación de fugas de gas (coef. 787,974, $p < 0,001$).

Tecnologías con efecto negativo o de eficacia poco consistente:

- Naviero (coef. -2,34 millones, $p < 0.001$) → se asocia con una disminución en la compensación.
- Varias tecnologías (biomasa, biodigestores, solar, eólica, forestación, compostaje, entre otras) no presentan significancia estadística ($p > 0.05$). Esto indica que, en el análisis global de los datos, su contribución no difiere del promedio.

País

La mayoría de los países presenta coeficientes negativos y significativos ($p < 0.001$), lo que evidencia que sus proyectos generan menores niveles de compensación que la categoría de referencia. Sin embargo, esta tendencia no es homogénea: casos como Estonia presentan efectos menos negativos, lo que refleja una heterogeneidad estructural influenciada por factores regulatorios, tecnológicos y de mercado, que afectan la eficacia de los proyectos y justifican un análisis comparativo más detallado entre contextos nacionales.

Estas diferencias responden principalmente a factores estructurales nacionales, como las normativas ambientales que determinan la elegibilidad y el valor de los proyectos, así como las condiciones del mercado, entre ellas los costos, la demanda y el precio del carbono. También influyen la disponibilidad y el tipo de proyectos, pues algunos países concentran iniciativas con mayor capacidad de compensación. En síntesis, el contexto nacional resulta decisivo, ya que no todos los entornos ofrecen las mismas condiciones ni oportunidades para la compensación ecológica, aspecto esencial para comparar o planificar proyectos internacionales.

La siguiente tabla, muestra los países con mayor efecto negativo (reducción más baja frente a la referencia)

Tabla 15

Países con mayor efecto negativo de disminución de CO₂

País	Coefficiente
Singapore	-2.599.121,87
Panama	-2.488.006,81
Côte d'Ivoire	-2.482.645,52
Uruguay	-2.529.095,04
Paraguay	-2.471.762,49

Nota. . Elaboración propia con base en el programa R

La siguiente tabla expone los países con efecto menos negativo (más cercanos a la referencia, “menos penalizados”)

Tabla 16

Países con menor efecto negativo de emisiones CO₂

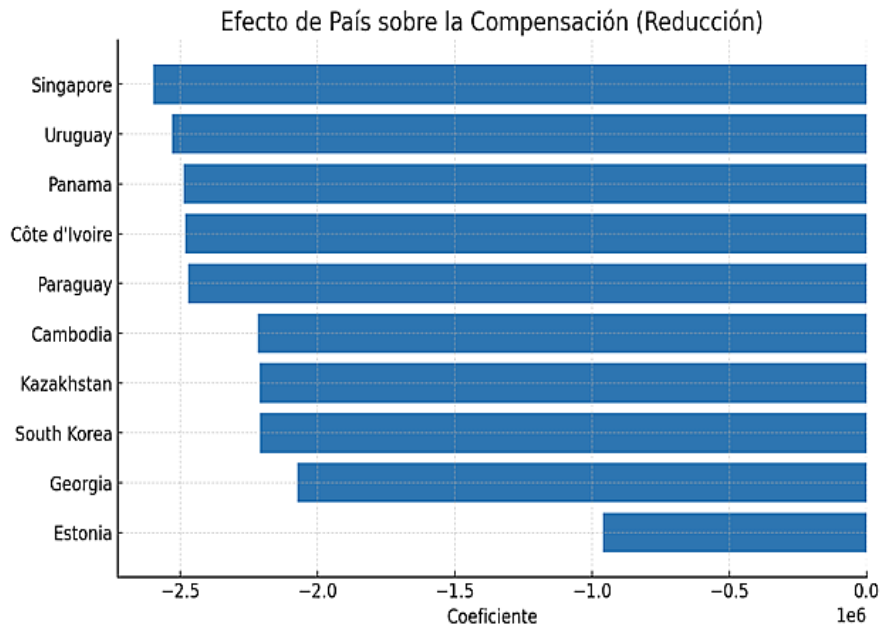
País	Coefficiente
Estonia	-960.504,33
Georgia	-2.073.107,15
South Korea	-2.209.869,23
Cambodia	-2.217.501,70
Kazakhstan	-2.211.426,59

Nota. Elaboración propia con base en el programa R

La siguiente gráfica permite observar el efecto del país como variable, sobre la compensación.

Figura 5

Comportamiento de la variable país respecto a la variable de compensación



Nota. Elaboración propia con base en el programa R

La gráfica evidencia que los países del primer grupo (tabla 16) reciben una compensación significativamente menor que la de la categoría de referencia, mientras que los del segundo grupo (tabla 17), aunque mantienen valores negativos, muestran un comportamiento más favorable. Esto sugiere que factores estructurales como las regulaciones nacionales, las condiciones del mercado y la disponibilidad de proyectos influyen de manera determinante en la eficacia de la compensación ecológica.

Asimismo, los tipos de proyecto 18 (Estufas) con un coeficiente de 2,25 millones ($p < 0,001$) y 29 (Mejora de la gestión forestal) con 3,14 millones ($p < 0,001$) destacan como los que más contribuyen a la compensación, consolidándose como categorías de alto impacto ambiental.

Algunas categorías de proyectos presentan efectos negativos estadísticamente significativos, lo que indica una menor contribución a la compensación ecológica en comparación con otras tipologías. Entre ellas se destacan:

- Vertedero de Metano [Tipo 4] con un coeficiente de -54.063 ($p = 0.045$),
- Manejo Sostenible de Pastizales [Tipo 27] con -70.845 ($p = 0.005$), y
- Destrucción de N_2O en la producción de ácido nítrico [Tipo 31] con -27.077 ($p = 0.032$).

Estos resultados reflejan que, aunque dichos proyectos contribuyen a la mitigación, su efectividad compensatoria es limitada, posiblemente debido a bajas tasas de reducción, costos elevados o restricciones tecnológicas que limitan su impacto ambiental neto.

Finalmente se obtuvo el siguiente modelo:

Modelo de regresión para la reducción de emisiones

Ecuación 1

Modelo de regresión para la reducción de emisiones.

$$\begin{aligned} \text{Reducción} = & \beta_0 + \beta_1 (\text{Créditos emitidos}) + \beta_2 (\text{Créditos retirados}) \\ & + \sum_{i=1}^{n_T} \beta_{T_i} (\text{Tipo}_i) + \sum_{j=1}^{n_P} \beta_{P_j} (\text{País}_j) + \sum_{k=1}^{n_{TP}} \beta_{TP_k} (\text{Tipo proyectos}_k) + \epsilon \end{aligned}$$

Donde:

- n_T = número de Tipos de proyectos
- n_P = número de Países
- n_{TP} = número de categorías dentro de Tipo proyectos

Cada variable categórica se representa como 0 o 1 según la presencia o ausencia de cada categoría.

Con el fin de elegir el modelo óptimo, se construyó un segundo modelo, como se explica a continuación.

4.4.3 Modelo Random Forest

Los Bosques Aleatorios (Cutler et al., 2012), desarrollados originalmente por Leo Breiman, constituyen una metodología aplicable tanto a variables categóricas (clasificación) como a variables continuas (regresión). Su estructura permite incorporar variables predictoras de distinta naturaleza y ofrece múltiples ventajas computacionales: evalúa la importancia de las variables, gestiona datos faltantes, admite la ponderación de clases, y maneja eficazmente problemas de alta dimensionalidad. Además, requiere pocos parámetros de ajuste, integra una estimación del error de generalización y puede ejecutarse de forma eficiente en entornos paralelos.

Con base en estas fortalezas, se construyó un nuevo modelo utilizando la metodología Random Forest, empleando la misma base de datos del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley que en el modelo de regresión inicial.

El modelado que arrojó la metodología Random Forest es el siguiente:

Ecuación 2

Modelo empleando Random Forest

$$\hat{Y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_t (X)$$

Para un Random Forest con T árboles, la predicción final, es el promedio de árboles individuales.

La ecuación expone el principio fundamental del Random Forest aplicado a la regresión. Cada árbol individual $f_t(x)$ genera una predicción independiente a partir de los datos de entrada x , y la predicción final del modelo (\hat{y}) se obtiene como el promedio de las T predicciones producidas por los distintos árboles. Este procedimiento permite reducir la varianza y mejorar la capacidad de generalización, al combinar múltiples estimadores individuales considerados débiles por separado en un modelo conjunto más estable, robusto y preciso.

El resultado de la sistematización de la información es el siguiente:

Tipo: Regresión

Modelo de regresión (predicción de valores numéricos), que es exactamente lo que se necesita para predecir "Reducción".

Estructura del Bosque

El modelo Random Forest se configuró con los siguientes parámetros técnicos:

- Número de árboles ($n = 500$): suficiente para garantizar la estabilidad y la convergencia de las predicciones, consideradas óptimas para un bosque aleatorio maduro.
- Tamaño de muestra ($n = 3897$): volumen adecuado de observaciones que aporta robustez estadística y fiabilidad en la estimación de los patrones del conjunto de datos.
- Número de variables independientes: 8, seleccionadas por su relevancia predictiva.
- $Mtry = 2$: en cada división de los árboles se evalúan dos variables aleatorias, lo que optimiza la diversidad del modelo y reduce la correlación entre árboles.
- Nodo mínimo = 5: cada hoja terminal debe contener al menos 5 observaciones, lo que evita el sobreajuste y mejora la capacidad de generalización del modelo.

Análisis de las métricas de desempeño del modelo Random Forest.

La evaluación del modelo Random Forest se realizó mediante el error de predicción out-of-bag (OOB) y el coeficiente de determinación (R^2).

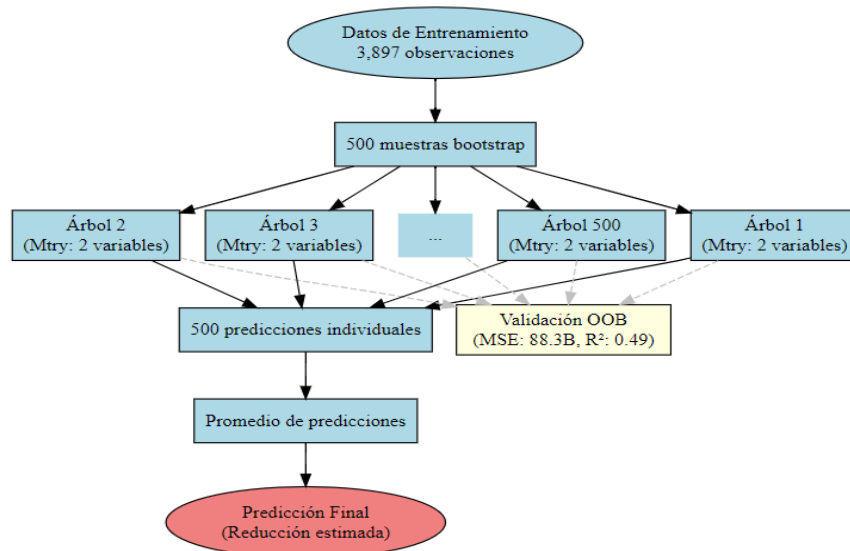
- Error OOB (MSE): 88,281,190,115. Este valor corresponde al error cuadrático medio calculado a partir de las observaciones excluidas en la construcción de cada árbol, reflejando la discrepancia promedio entre los valores reales y los predichos. Aunque su magnitud es alta, debe interpretarse en función de la escala de la variable dependiente.
- R^2 (OOB): 0.489 (48.9%). Esto significa que el modelo explica cerca del 49% de la variabilidad de la variable *Reducción*. Si bien este poder explicativo es moderado y menor que el obtenido con la regresión lineal ajustada ($\approx 77\%$), evidencia que las variables incluidas mantienen capacidad predictiva significativa en el esquema no lineal del bosque aleatorio.

Análisis de la complejidad del modelo y de sus representaciones.

Para considerar la orientación metodológica del modelo se procedió a generar un diagrama de flujo de la siguiente forma:

Figura 6

Diagrama de flujo del modelo Random Forest

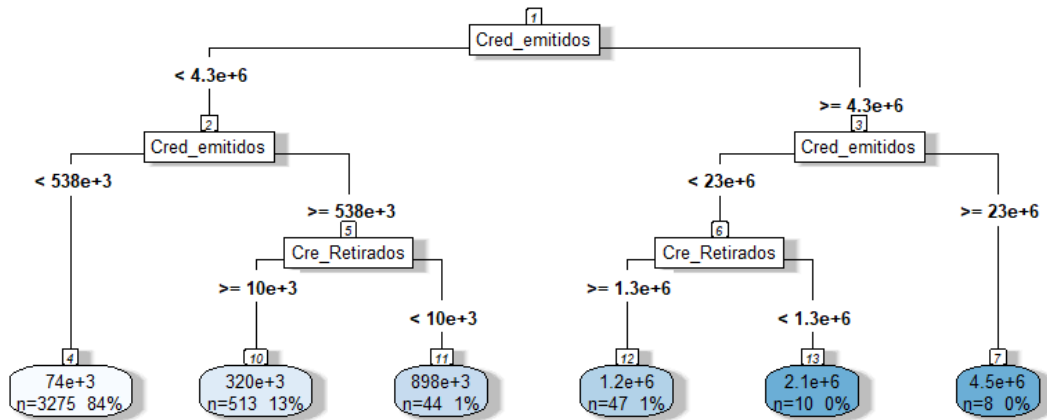


Nota. Elaboración propia con base en el programa R

Con base en el diagrama de flujo se plantea la construcción del bosque empleando la base de datos inicial, como lo representa la siguiente figura:

Figura 7

Árbol de decisión individual simplificado



Estructura básica de los 500 árboles en el Random Forest

Nota. Elaboración propia con base en el programa R.

Como se indicó previamente, representar gráficamente un bosque con 500 árboles resulta impracticable. Por ello, el análisis se enfoca en tres aspectos clave: la importancia de las variables, que identifica los factores con mayor influencia en la reducción; las curvas de dependencia parcial, que muestran cómo varía la predicción de *Reducción* al modificar una variable específica manteniendo las demás constantes; y la distribución de los errores OOB, que permite determinar si los errores del modelo son sistemáticos o aleatorios. Estas representaciones sintetizan de manera clara el comportamiento general del Random Forest sin requerir la visualización individual de cada árbol.

El modelo Random Forest muestra un equilibrio adecuado entre complejidad y capacidad predictiva, alcanzando un R^2 del 49% validado mediante el error OOB y respaldado por un tamaño de muestra robusto. Aunque su nivel de ajuste es inferior al del modelo de regresión

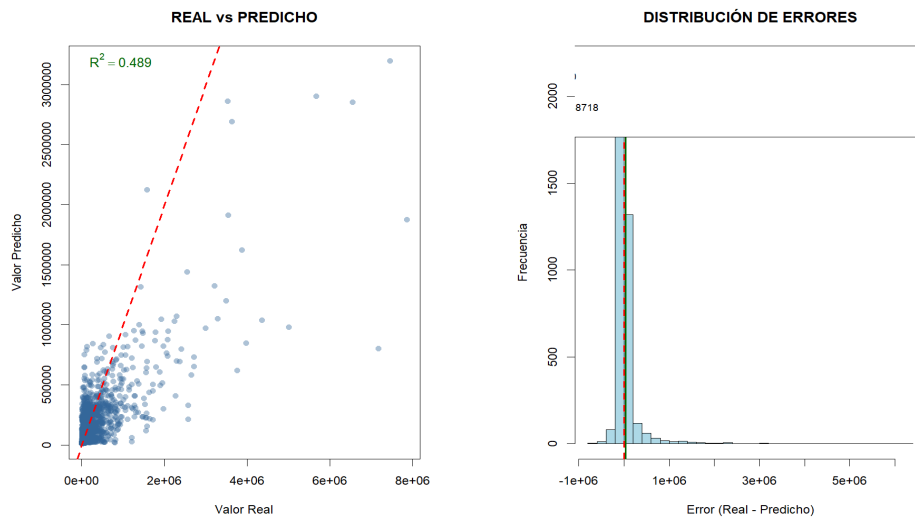
lineal, destaca por su capacidad para captar relaciones no lineales, interacciones y patrones complejos entre las variables. Las gráficas de importancia de variables y de dependencia parcial resultan esenciales para su interpretación aplicada, dado que la visualización completa del bosque es impracticable, pero su análisis conjunto permite comprender con mayor precisión la dinámica del modelo.

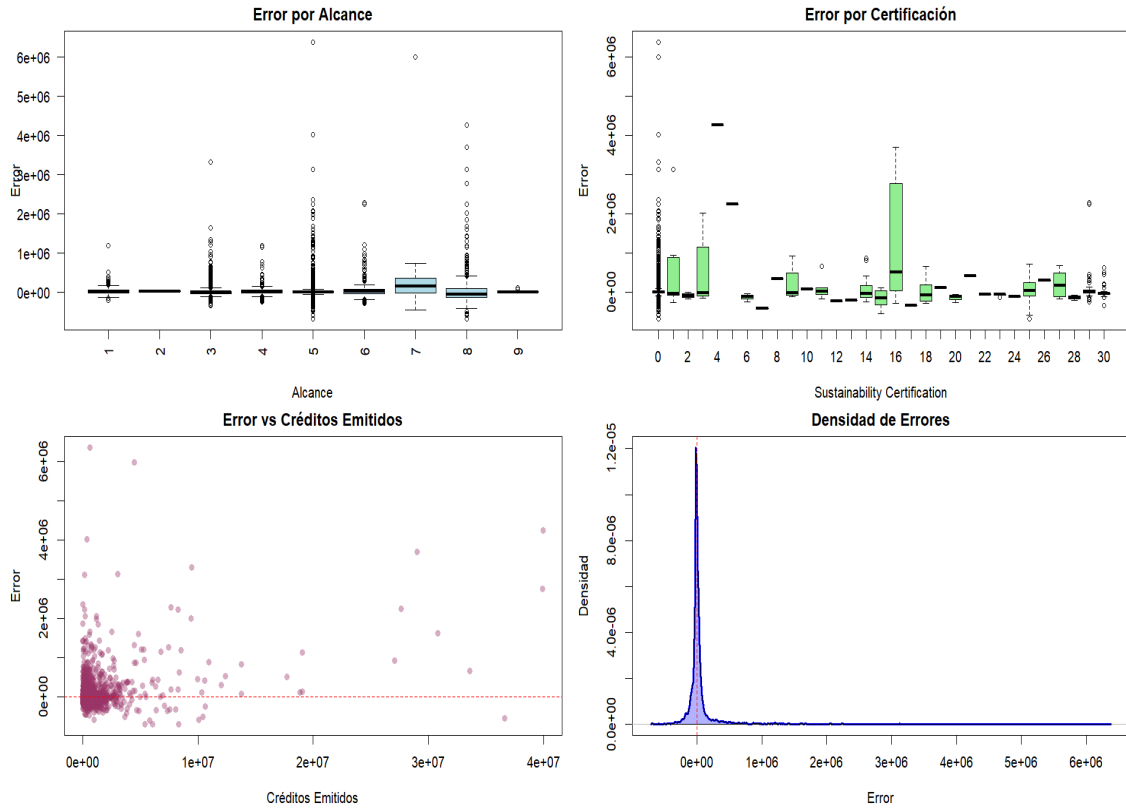
Diagrama de flujo del proceso Random Forest

Las siguientes gráficas permiten visualizar la predicción del modelo Forest:

Figura 8

Predicción del modelo Random Forest





Nota. Elaboración propia con base en el programa R

Para interpretar los resultados del modelo Random Forest, se aplicó el método SHAP (SHapley Additive exPlanations) (Santos et al., 2024), una técnica de interpretación de modelos de aprendizaje automático basada en la teoría de juegos. Este enfoque permite descomponer cada predicción, atribuyendo a cada variable su contribución específica al resultado.

El método SHAP ofrece explicaciones detalladas y personalizadas para cada observación, además de una visión integrada del comportamiento global del modelo. A través de este análisis se identifican las variables con mayor influencia en la dirección del efecto, se examinan las relaciones no lineales entre los predictores y la variable dependiente, y se justifican las

aportaciones individuales que explican por qué el modelo asigna un valor determinado a cada caso, fortaleciendo la transparencia y la interpretabilidad del proceso predictivo.

Análisis de la Importancia de Variables por SHAP (Contribución al valor previsto del objetivo)

Ranking de Importancia:

Tabla 17

Ranking de importancia de las variables por SHAP

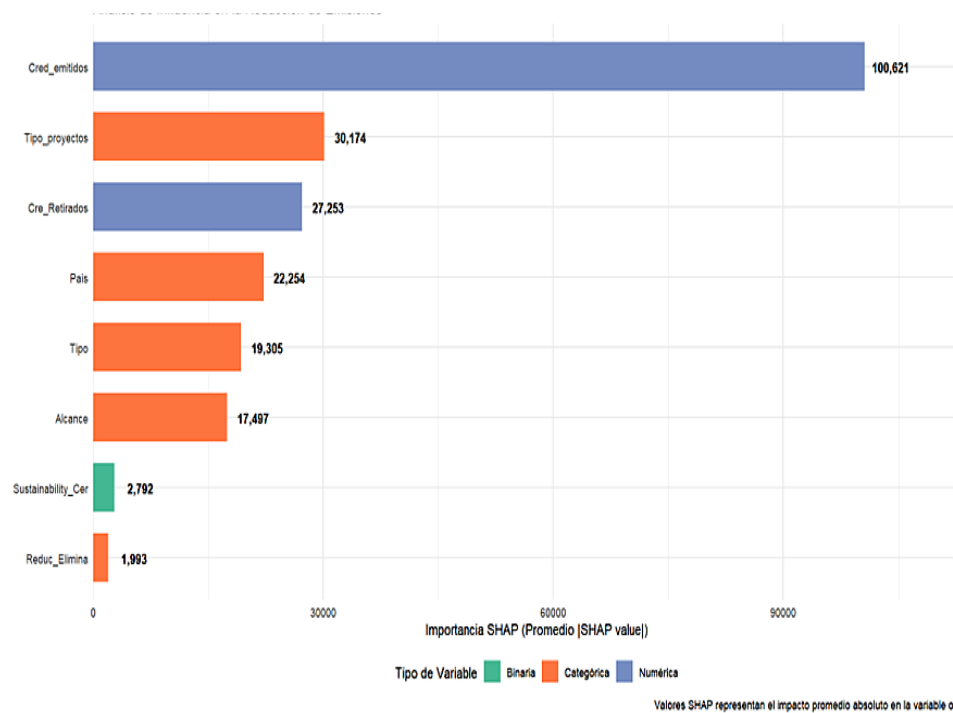
Orden de importancia	Variable
1	Cred_emitidos (100,620.58)
2	Tipo proyectos (30,173.67)
3	Cre_Retirados (27,252.79)
4	Cre_Retirados (27,252.79)
5	País (22,254.27)
6	Alcance (17,497.48)
7	Sostenibilidad_Cer (2,791.91)
8	Reduc Elimina (1,993.45)

Nota. Elaboración propia

Estas variables gráficamente se evidencian como lo muestra la siguiente figura:

Figura 9

Importancia de las variables por SHAP Values



Nota. Elaboración propia con base en R

Grupo 1: Variables de alto impacto (Influencia Significativa)

Cred_emitidos – Relevancia: 100.620,58.

Esta variable (créditos emitidos) se consolida como la más determinante del modelo, con una influencia 3,3 veces superior a la de la segunda variable en orden de importancia. Su elevado valor SHAP promedio absoluto evidencia que incluso pequeñas variaciones en los créditos emitidos generan cambios sustanciales en la predicción de la reducción de emisiones. Esto confirma una relación fuerte, estable y positiva entre el volumen de créditos emitidos y la capacidad compensatoria del proyecto, lo que la posiciona como el principal predictor de la eficacia de la compensación ecológica.

Grupo 2: Variables de alta relevancia analítica.

Tipo_proyectos (30.173,67) y **Cre_Retirados** (27.252,79) se posicionan como variables con influencia significativa, aunque de menor magnitud que **Cred_emitidos**.

La variable **Tipo_proyectos**, en segundo lugar en relevancia, evidencia que las características técnicas y operativas del proyecto influyen de manera sustancial en el nivel de reducción alcanzado. En cuanto a **Cre_Retirados**, su peso estadístico confirma que la cantidad de créditos efectivamente retirados actúa como un indicador clave de la efectividad y madurez del proceso compensatorio dentro del modelo.

Grupo 3: Variables de importancia moderada

País (22,254.27) y **Tipo** (19,304.77): El territorio en el que se ejecuta el proyecto tiene un impacto considerable en las reducciones observadas, lo que sugiere que las condiciones geográficas, normativas y socioambientales del país influyen en su desempeño. De igual forma, la naturaleza de la actividad o la tecnología aplicada (**Tipo**) evidencia una importancia relevante, aunque con una menor incidencia respecto del tipo específico de proyecto (**Tipo_proyectos**). Por su parte, la variable **Alcance** (17,497.48) refleja una influencia moderada pero claramente perceptible en el modelo, lo que indica que la amplitud o cobertura del proyecto también contribuye de manera apreciable a la variabilidad explicada.

Grupo 4: Variables de mínima influencia

En el Modelo de Predicción, estas variables tienen una incidencia marginal en los resultados proyectados. La certificación de sostenibilidad (**Sustainability_Cer**) no tiene un efecto prácticamente nulo en las estimaciones, lo que sugiere que su presencia o ausencia no modifica de manera significativa las proyecciones del modelo. Asimismo, el tipo de reducción o

eliminación (Reduc_Elimina) se posiciona como la variable con menor peso explicativo, lo que indica que su influencia en la predicción del comportamiento de las reducciones es mínima en comparación con el resto de los factores analizados.

Análisis de la disparidad en la relevancia de las variables:

La existencia de una diferencia aproximada de 50 veces entre la variable más influyente y la de menor peso evidencia una distribución de relevancia marcadamente asimétrica. Este patrón es común en modelos aplicados a contextos reales, donde el rendimiento predictivo suele depender de un conjunto limitado de variables de alta capacidad explicativa.

En este caso, el análisis del modelo indica que la magnitud del proyecto representada por la cantidad de créditos emitidos constituye el principal factor predictivo de las reducciones de emisiones, superando en importancia a las particularidades del tipo de proyecto y al entorno geográfico en el que se desarrolla.

4.4.4 Regresión con Regularización: Lasso, Ridge y Elastic Net

Una tercera técnica aplicada para el modelado de los datos fue la regresión con regularización, en sus tres variantes: Lasso, Ridge y Elastic Net. Según Nur et al. (2023), este enfoque resulta especialmente útil cuando existe multicolinealidad, es decir, una alta correlación entre las variables predictoras, lo cual puede generar problemas en los modelos de regresión, especialmente cuando se dispone de un número elevado de predictores.

Para contrarrestar esta situación, se recurre a diversos métodos de regularización. La regresión de cresta (Ridge) busca controlar la varianza de los coeficientes evitando su dispersión excesiva; el operador de selección y contracción mínima absoluta (LASSO) reduce algunos coeficientes hasta llevarlos a cero, permitiendo así la selección automática de variables; mientras

que la red elástica (Elastic Net) combina los efectos de ambos métodos, equilibrando la penalización entre la reducción y la selección de coeficientes.

El propósito de aplicar esta técnica fue evaluar y comparar el desempeño de los tres modelos Ridge, Lasso y Elastic Net en función del número de predictores, en particular al incorporar variables dicotómicas derivadas de factores categóricos, como el país, que en este caso cuenta con 106 niveles, con el fin de prevenir el sobreajuste del modelo. Los análisis se realizaron utilizando las variables incluidas en la Base de Datos de Compensaciones del Registro Voluntario v2025-04, perteneciente al Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley de la Universidad de California, Berkeley.

Ecuación General del Modelo Elastic Net La evaluación de la influencia de las variables se mantuvo con base en la **magnitud de los coeficientes estandarizados** obtenidos en el modelo. En este sentido, una variable con un coeficiente más alto en términos absolutos refleja una **mayor capacidad explicativa** de la variable dependiente. No obstante, la incorporación de penalizaciones en los modelos de regularización garantiza que dicha influencia sea **genuina**, evitando que se deba a ruido o a correlaciones espurias entre predictores.

Para el análisis y la eventual selección del modelo más adecuado, se consideraron los siguientes criterios metodológicos:

- Lasso (L1): recomendado para la selección automática de variables, ya que reduce algunos coeficientes a cero y elimina aquellos con menor aporte al modelo.
- Ridge (L2): apropiado cuando todas las variables pueden aportar información relevante, al reducir la varianza sin eliminar los predictores.

- Elastic Net: combina las ventajas de L1 y L2, ofreciendo un equilibrio entre la selección de variables y la estabilidad del modelo, aprovechando los beneficios de ambos enfoques de regularización.

El modelo Elastic Net combina la regresión lineal múltiple con la regularización L1 (Lasso) y L2 (Ridge). La ecuación predictiva es:

Ecuación 3

Modelo Elastic Net

$$Y\hat{y}_i = \beta_0 \sum_{j=1}^p \beta_j X_{IJ}$$

Donde:

\hat{y}_i = es el valor predicho de "Reducción" para la observación i

β_0 = es el intercepto (143,332.71)

β_j = son los coeficientes de las variables predictoras

X_{IJ} = son los valores de las variables predictoras

p = es el número de variables predictoras

Función de Optimización

Elastic Net minimiza la siguiente función de costo:

Ecuación 4

Minimización de la función del costo con Elastic Net

$$\min_{\beta_0, \beta} \left\{ \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N y_i - (\beta_0 - X_i^T \beta)^2 + \lambda \left[\frac{1}{2} (1 - \alpha) \|\beta\|_2^2 + \alpha \|\beta\|_1 \right] \right\}$$

Donde:

- y_i : valor real de la variable dependiente ("Reducción").
 $(\beta_o - X_i^T \beta)$: valor predictor.
 β_o : intercepto.
 β : vector de coeficientes de las variables predictoras.
 X_i^T : vector de valores de las variables predictoras para la observación i .
 N : número de observaciones.
 λ Lamb: parámetro de regularización (controla la penalización).
 α Alpha: parámetro que pondera entre el Lasso (L1) y el Ridge (L2).

Componentes de la Función:

1. Término de Error Cuadrático Medio:

$$\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N y_i - (\beta_o - X_i^T \beta)^2$$

Este es el error cuadrático medio (MSE). Mide la distancia entre las predicciones y los valores reales. El modelo busca minimizar esta diferencia.

2. Penalización L2 (Ridge):

$$\frac{1}{2} (1 - \alpha) \|\beta\|_2^2 = \frac{1}{2} (1 - \alpha) \sum_{j=1}^p \beta_j^2$$

Este método penaliza el **cuadrado de la magnitud de los coeficientes**, lo que reduce la varianza del modelo y evita que dichos coeficientes adquieran valores excesivamente altos. Resulta especialmente adecuado en contextos donde existe **una alta correlación entre las**

variables predictoras, ya que contribuye a estabilizar las estimaciones y a mejorar la capacidad de generalización del modelo.

3. Penalización L1 (Lasso):

$$\alpha \|\beta\|_1 = \sum_{j=1}^p |\beta_j|$$

Este método penaliza el valor absoluto de los coeficientes, lo que promueve que algunos se reduzcan exactamente a cero, lo que le permite funcionar como un mecanismo de selección de variables. Su aplicación resulta especialmente útil cuando se pretende mantener únicamente los predictores más significativos, lo que incrementa la parsimonia y la fiabilidad del modelo al eliminar factores con escasa influencia explicativa.

4. Término de Regularización (Penalización Elastic Net)

$$\lambda \left[\rho |\beta|_1 + (1 - \rho) \frac{1}{2} |\beta|_2^2 \right]$$

El término de regularización corresponde a una penalización adicional incorporada a la función de error del modelo, cuyo propósito es controlar el tamaño de los coeficientes (β). Esta penalización impide que los coeficientes adopten valores excesivamente grandes, lo que podría hacer que el modelo se vuelva demasiado sensible a pequeñas fluctuaciones en los datos de entrenamiento, favoreciendo así una mayor estabilidad y capacidad de generalización en las predicciones.

Fundamento de la Elección: El Balance L1, L2 de Elastic Net para un Modelo de Compensación Robusto y Validado.

El modelo Elastic Net fue seleccionado debido a su capacidad para superar las limitaciones tanto de la regresión lineal tradicional como del algoritmo Random Forest, al analizar la variable dependiente *Reducción de Emisiones en CO₂eq* en relación con las variables

independientes propias del mercado de carbono, tales como los créditos emitidos, el país, el tipo de proyecto y otros factores asociados.

1. Robustez ante la alta dimensionalidad y parsimonia (Penalización L1 - Lasso)

El conjunto de datos del mercado de carbono presenta una estructura altamente compleja, principalmente debido a la presencia de un gran número de variables categóricas (como *País*, *Tipo de Proyecto*, *Registro Voluntario* o *Verificador*). Al transformarlas en variables dummy para su incorporación al modelo, se incrementa exponencialmente el número de predictores, lo que puede conducir a problemas de sobreajuste y a la pérdida de interpretabilidad. En este contexto, la penalización L1 incorporada en el Elastic Net contribuye a reducir la dimensionalidad al eliminar predictores irrelevantes, lo que garantiza un modelo más parsimonioso y eficiente sin sacrificar su capacidad explicativa.

Problema que resuelve:

Un modelo de regresión lineal simple tendería a sobreajustarse (overfitting) ante la presencia de numerosas variables redundantes o irrelevantes, ajustándose excesivamente a los datos de entrenamiento y perdiendo capacidad de generalización ante nuevos proyectos del mercado de carbono.

Valor agregado de L1 (Lasso):

La penalización L1 del método Lasso obliga a que los coeficientes de las variables de baja influencia se reduzcan a cero, eliminándolas del modelo. Esto permite conservar únicamente las variables con verdadero poder explicativo, optimizando la estructura del modelo y evitando el ruido estadístico.

Resultado práctico:

El modelo realiza una selección automática de variables relevantes, filtrando el conjunto inicial de predictores y reteniendo solo aquellas que contribuyen significativamente a explicar la reducción de las *emisiones de CO₂eq*. De esta forma, el modelo se vuelve más interpretable y eficiente desde el punto de vista analítico.

Beneficio para el gerente de proyectos:

El modelo resultante es más simple, transparente y enfocado, facilitando que el gerente de proyectos identifique con claridad los factores determinantes de la compensación de carbono, como, por ejemplo, pertenecer al registro Gold Standard o la localización del proyecto en Brasil, y distinga aquellos elementos que pueden ser marginales o prescindibles en la toma de decisiones estratégicas.

2. Estabilidad y manejo de la multicolinealidad (Penalización L2 - Ridge)

En los mercados financieros y ambientales, es común que las variables predictoras presenten multicolinealidad, es decir, una alta correlación entre sí (por ejemplo, el *total de créditos emitidos podría estar estrechamente relacionado con la capacidad total del proyecto*).

Problema que resuelve:

El modelo Lasso puro (L1) tiende a seleccionar una variable entre dos variables fuertemente correlacionadas y a eliminar la otra, lo que puede generar inestabilidad en las estimaciones o incluso llevar a descartar una variable teóricamente relevante.

Valor agregado de L2 (Ridge):

La **penalización L2** atenúa este problema al reducir los coeficientes de todas las variables, sin eliminarlas por completo. De esta manera, se mantiene la contribución de cada predictor, aunque con un peso controlado, evitando que algunos dominen el modelo.

Resultado práctico:

El componente Ridge actúa como un “estabilizador” del modelo, agrupando las variables correlacionadas y asignándoles coeficientes pequeños pero consistentes. En el caso del Elastic Net, este equilibrio permite retener información relevante sin incurrir en sobreajuste ni en pérdida de interpretabilidad.

Beneficio para el gerente de proyectos:

El modelo resultante es robusto y estable, garantizando que las predicciones sean consistentes y confiables, incluso en escenarios en los que las variables del mercado de carbono están interrelacionadas. Esto permite al gerente de proyectos tomar decisiones basadas en resultados más sólidos, minimizando el riesgo de depender de relaciones espurias o fluctuaciones estadísticas.

4. Convergencia Ética y Cuantificable en la Gobernanza de Proyectos

El vacío principal que aborda la tesis radica en la ausencia de una herramienta técnica, dentro de los marcos de gobernanza de proyectos, que integre de manera coherente la métrica de CO₂ con las dimensiones éticas y de calidad en la gestión sostenible. Este modelo busca llenar ese espacio mediante un enfoque cuantitativo y normativo que vincula el rendimiento ambiental con la responsabilidad moral y la transparencia institucional.

Implicación ética:

El modelo propuesto permite **validar empíricamente** qué **criterios de certificación** particularmente los más rigurosos y con mayores costos de verificación están estadísticamente asociados con una reducción de emisiones más efectiva. De este modo, ofrece al gerente de proyectos una guía técnica y ética para priorizar créditos de carbono de alta calidad frente a opciones más económicas pero de menor impacto verificable, fortaleciendo la integridad ambiental de las decisiones de compensación.

Transparencia y trazabilidad:

A diferencia de modelos opacos como el Random Forest, la formulación basada en Elastic Net produce una ecuación explicable, en la que cada coeficiente puede interpretarse, justificarse y auditarse ante los distintos stakeholders, reguladores y comunidades involucradas. Esto garantiza el cumplimiento del principio bioético de transparencia, indispensable en los procesos de toma de decisiones que afectan al medio ambiente y a la sociedad.

Seguridad y principio de precaución:

Además, el modelo presenta una alta estabilidad estadística, lo que reduce la posibilidad de errores o fluctuaciones significativas en las predicciones. Esta característica minimiza el riesgo de subcompensación es decir, de no neutralizar adecuadamente las emisiones generadas y, por ende, cumple con el Principio de Precaución de la Bioética Ambiental, al priorizar decisiones prudentes, verificables y orientadas a la protección efectiva del entorno.

La siguiente tabla resume el valor agregado de Elastic Net, respecto al modelo:

Tabla 18

Valor agregado de Elastic Net en la elección del desarrollo del modelo de compensación ecológica

Valor Agregado Estratégico	Implicación para el Modelo Final
Cuantificación Coherente	El modelo utiliza la métrica clave (tCO ₂ e) y, gracias a su rigor, ofrece una estimación técnica y no subjetiva de la compensación requerida, cerrando la brecha de "cuánto y cómo compensar" (Wende et al., 2018).
Gobernanza Ética y de Calidad	Al retener las variables más influyentes (como las relacionadas con el Verificador o el Registro Voluntario), el modelo traduce la necesidad bioética de adicionalidad y permanencia en un coeficiente estadístico que guía al gerente de proyecto hacia proyectos de alta calidad.
Replicabilidad y Aplicación	El modelo final es una fórmula cuantificable y reproducible, que asiste directamente al gestor en la toma de decisiones, un aporte que no se encuentra en los marcos normativos tradicionales de gestión de proyectos.

Nota. Elaboración propia

La Tabla 18 sintetiza el aporte del modelo Elastic Net, destacando su superioridad ético-metodológica al abordar la complejidad estructural del mercado de compensación de CO₂eq. Desde la perspectiva de la bioética aplicada a la gestión de proyectos, este modelo se articula con los principios de responsabilidad y transparencia, al mitigar de manera efectiva dos de los riesgos estadísticos más relevantes en la modelación predictiva.

En primer lugar, la penalización L1 (Lasso) funciona como un mecanismo de parsimonia y depuración de calidad, al reducir a cero los coeficientes de las variables con escasa o nula relevancia estadística. De este modo, la predicción de las reducciones de emisiones de CO₂eq se sustenta exclusivamente en indicadores con influencia demostrada, lo que permite al gestor de proyectos validar empíricamente la relación entre las reducciones efectivas y las variables asociadas a estándares de alta calidad, tales como el tipo de registro o de verificación, factores clave para garantizar la Adicionalidad y la Permanencia de los proyectos de compensación.

En segundo lugar, la penalización L2 (Ridge) aporta estabilidad predictiva al controlar la multicolinealidad entre las variables del mercado, evitando la distorsión de los coeficientes y fortaleciendo la robustez del modelo. Este enfoque reduce el riesgo de subcompensación, aumenta la confiabilidad de los resultados y ofrece una herramienta de toma de decisiones ética, justificable y científicamente sólida ante los stakeholders y en coherencia con el deber intergeneracional que exige la bioética ambiental.

Aspectos generales para la interpretación de parámetros de Elastic Net

El modelo Elastic Net requiere definir dos hiperparámetros fundamentales que determinan su comportamiento: λ (lambda) y α (alfa).

El primero regula la intensidad total de la penalización, mientras que el segundo controla el grado de combinación entre las penalizaciones L1 (Lasso) y L2 (Ridge), lo que permite ajustar el equilibrio entre parsimonia y estabilidad del modelo.

λ (lambda): parámetro de regularización global

- Representa la fuerza general de la penalización aplicada a los coeficientes β .
- A medida que λ aumenta, el modelo restringe más los coeficientes, reduciendo su magnitud y simplificando su estructura.
- Si λ es demasiado grande, los coeficientes pueden acercarse a cero, lo que genera un modelo subajustado; en cambio, si λ es muy pequeño, el modelo puede sobreajustarse a los datos de entrenamiento.
- Por tanto, λ actúa como un control de equilibrio entre sesgo y varianza, determinando el nivel de suavizado necesario para lograr una predicción estable y generalizable.
- Aumentar el valor de λ hace que la regularización sea más fuerte, llevando a los coeficientes β a valores más cercanos, de manera más drástica, a 0.
- Un λ bajo implica menos regularización. Esto puede conducir a modelos (betas) más complejos que se ajustan mejor a los datos en términos absolutos.

α (alfa): el parámetro de mezcla entre L1 y L2

Descripción

Cuando $\alpha = 1$, el modelo aplica únicamente la penalización Lasso (L1). En este escenario, la fuerza de la regularización impulsa a que algunos coeficientes β se reduzcan exactamente a cero, lo que permite seleccionar las variables más relevantes y, al mismo tiempo, manejar la multicolinealidad entre predictores mediante la eliminación de aquellos con menor aporte explicativo.

Cuando $\alpha = 0$, se utiliza exclusivamente la regularización Ridge (L2). Esta técnica controla la magnitud de los coeficientes, acercándolos a cero sin anularlos completamente, lo que contribuye a estabilizar el modelo sin realizar selección de variables.

Finalmente, **cuando $0 < \alpha < 1$** , se aplica la combinación característica del Elastic Net, que integra las ventajas de L1 y L2. Este enfoque permite reducir la complejidad de los coeficientes al tiempo que selecciona las variables más influyentes, logrando un equilibrio óptimo entre parsimonia, estabilidad y capacidad predictiva.

Durante la selección de los valores óptimos de λ y α , se buscó mantener un **equilibrio entre la simplicidad del modelo y su capacidad de ajuste al conjunto de entrenamiento**, garantizando tanto la interpretabilidad como la validez predictiva. En particular:

- Un **valor alto de λ** provoca que la mayoría de los **coeficientes β se aproximen a cero**, lo que genera un **modelo más simple y generalizable**, aunque con un **mayor sesgo**, ya que parte de la información explicativa puede perderse.
- En contraste, un valor bajo de λ ($\lambda \approx 0$) reduce la regularización, permitiendo que el modelo se ajuste estrechamente a los datos de entrenamiento. Si bien esto puede aumentar temporalmente el poder predictivo, incrementa el riesgo de sobreajuste, afectando su desempeño ante nuevos datos.

Por su parte, la elección del parámetro α resulta determinante, pues define la naturaleza de la penalización: valores próximos a 1 favorecen el comportamiento tipo Lasso, centrado en eliminar predictores irrelevantes y manejar la colinealidad; valores cercanos a 0 priorizan el efecto Ridge, orientado a reducir la influencia de variables correlacionadas sin excluirlas; mientras que valores intermedios ($0 < \alpha < 1$) permiten una combinación balanceada, integrando las ventajas de ambos enfoques para lograr un modelo robusto, parsimonioso y estable.

Interpretación de los Coeficientes del Modelo Elastic Net

El modelo generó los siguientes **coeficientes estimados**, los cuales permiten **interpretar** cuantitativamente el impacto y la dirección de cada variable predictora sobre la variable dependiente “Reducción”. A partir de estos resultados, es posible comprender qué factores contribuyen positiva o negativamente a la disminución de emisiones de CO₂eq, así como la magnitud relativa de su influencia dentro del modelo.

Cada coeficiente representa el **cambio esperado en la reducción de emisiones** ante una variación unitaria en la variable predictora, **manteniendo las demás constantes**:

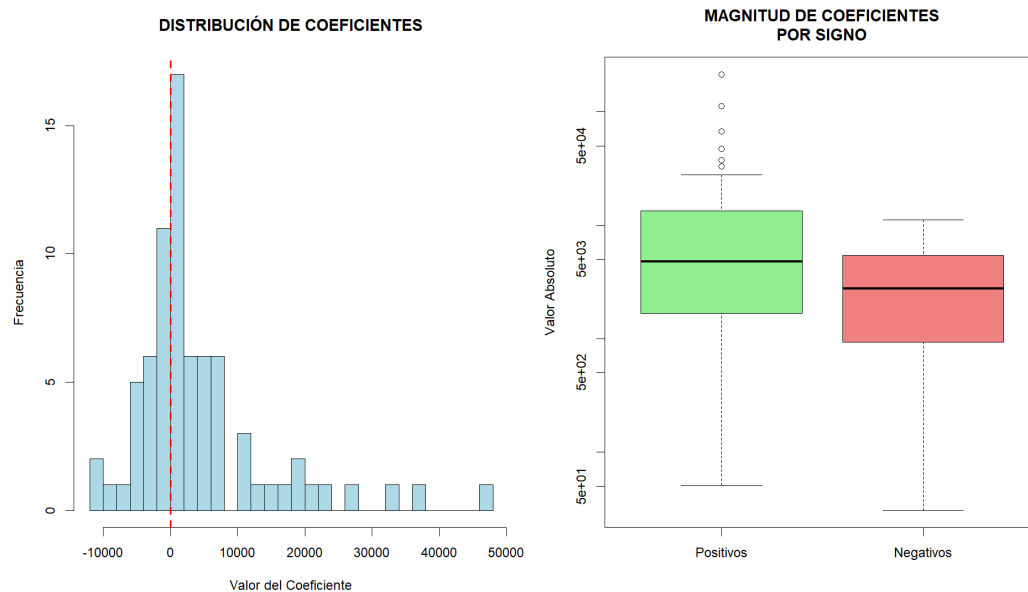
- **Coeficientes positivos:** indican que un aumento en la variable predictora se asocia con una **mayor reducción de emisiones**, reflejando un **efecto potenciador** sobre el desempeño ambiental.
- **Coeficientes negativos:** señalan que el incremento de dicha variable disminuye la reducción de emisiones, es decir, ejerce un efecto adverso o compensatorio menor.
- **La magnitud del coeficiente refleja la intensidad del efecto, mientras que su signo (+/-) determina la dirección de la relación.**

Esta interpretación, derivada de los coeficientes del modelo **Elastic Net**, permite **identificar los predictores más determinantes** del comportamiento de la variable *Reducción*, ofreciendo una **base empírica sólida** para la **toma de decisiones estratégicas y éticamente informadas** en la gestión de proyectos de compensación de carbono.

Distribución y magnitud de los coeficientes del modelo Elastic Net

Figura 10

Distribución y magnitud de los coeficientes del Modelo Elastic Net



Nota. Elaboración propia con base en el programa R

La gráfica ofrece una **doble perspectiva visual** sobre la **distribución e intensidad de los coeficientes estimados** por el modelo **Elastic Net**, permitiendo analizar tanto la frecuencia de los efectos como su magnitud relativa.

En el panel izquierdo, el histograma muestra cómo se distribuyen los coeficientes de las variables predictoras. La concentración de las barras alrededor del valor cero evidencia que la mayoría de las variables tiene un efecto mínimo o nulo sobre la reducción de emisiones. Sin embargo, se distingue un conjunto reducido de coeficientes con valores extremos, tanto positivos

como negativos, reflejando la existencia de predictores con una influencia significativa en el comportamiento de la variable dependiente. La cola derecha más prolongada del histograma sugiere la presencia de coeficientes excepcionalmente altos, mientras que la **línea roja vertical** marca el punto de referencia cero, separando los efectos **positivos (incremento en la reducción)** de los **negativos (disminución en la reducción)**.

En el **panel derecho**, el diagrama de caja compara los coeficientes según su signo, utilizando una escala logarítmica para resaltar las diferencias en magnitud. Se observa que los coeficientes positivos, representados en verde, tienden a ser más grandes y dispersos, con varios valores atípicos en el extremo superior, lo que indica que las variables asociadas al aumento de la compensación de CO₂eq ejercen un efecto más potente. En contraste, los coeficientes negativos, mostrados en rojo, son menores en magnitud y menos variables, reflejando efectos limitados y más homogéneos.

En síntesis, la visualización confirma que el modelo Elastic Net logra identificar un grupo selecto de variables con influencia real y direccionalmente positiva sobre la reducción de emisiones, mientras que la mayoría de los predictores se mantienen con impacto marginal o nulo, lo que refuerza la parsimonia y estabilidad estadística del modelo.

Variables Numéricas:

Cantidad de Créditos Emitidos ($\beta = 214.338,14$):

Cada crédito adicional emitido por el proyecto, manteniendo constantes las demás variables del modelo, se asocia con un incremento estimado de 214.338,14 unidades en la reducción de emisiones. Este resultado evidencia que la cantidad total de créditos emitidos es un predictor clave de la capacidad del proyecto para generar reducciones efectivas de CO₂eq. En términos

prácticos, esta variable refleja tanto la escala operativa del proyecto como su potencial de mitigación, lo que confirma su papel central dentro del comportamiento predictivo del modelo.

Cantidad de Créditos Retirados ($\beta = 22,114.90$):

Por cada crédito adicional retirado que tenga el proyecto, manteniendo constantes todas las demás variables, se esperaría que la reducción estimada aumentara en 22.114,90 unidades. Esto indica que la cantidad de créditos retirados contribuye a mejorar la capacidad de reducción, ya que evidencia que los agentes económicos los utilizaron para compensar sus emisiones.

Variables Categóricas (efectos fijos con dummies (generación de variables dicotómicas))

Dummy País: Camboya ($\beta = 19.142,74$):

En promedio, los proyectos desarrollados en **Camboya** presentan una reducción estimada 19.142,74 unidades superior a la de los proyectos ubicados en el país de referencia (omitido en la codificación de variables). Este comportamiento podría estar asociado a marcos regulatorios nacionales favorables, políticas de incentivo a la compensación o una mayor eficiencia en la implementación de mecanismos de mitigación, lo que se traduce en una mayor efectividad de la reducción de emisiones verificables.

Dummy País: Brasil ($\beta = -5.886,25$):

En contraste, los proyectos situados en **Brasil** muestran, en promedio, una reducción 5.886,25 unidades menor en comparación con el país de referencia. Esta diferencia puede explicarse por condiciones normativas, estructurales o de mercado que podrían restringir la magnitud de las reducciones reconocidas o certificadas, o bien por diferencias en la eficiencia tecnológica o en los criterios de verificación aplicados. En conjunto, este resultado refleja cómo

el contexto geográfico y regulatorio incide de manera significativa en el desempeño ambiental de los proyectos del mercado de carbono.

La siguiente gráfica muestra el impacto, tanto positivo como negativo, por país respecto al modelo.

Figura 11

Impacto geográfico relativo en la Reducción: Top 10 países con efecto positivo y negativo (coeficientes β – Elastic Net)



Nota. Elaboración propia

La figura compara los coeficientes estimados (β) correspondientes a las variables dummy por país dentro del modelo Elastic Net, proporcionando una visión clara de cómo el contexto geográfico incide en la capacidad de reducción de emisiones. La representación se divide en dos secciones: a la izquierda se muestran los diez países con impacto positivo, y a la derecha, los diez con impacto negativo sobre la variable dependiente *Reducción*.

Cada barra refleja el efecto aditivo promedio de pertenecer a un país determinado en comparación con el país de referencia omitido, manteniendo constantes otras covariables relevantes como los créditos emitidos, el tipo de proyecto o la tecnología empleada.

Los coeficientes positivos revelan una mayor reducción esperada de emisiones, destacando los casos de Papúa Nueva Guinea, Estonia y Camboya, donde los proyectos muestran una eficacia superior en sus resultados de mitigación. En contraste, los coeficientes negativos señalan una menor reducción relativa, observándose este comportamiento en Madagascar, Uruguay y Singapur, lo que sugiere que factores estructurales, regulatorios o tecnológicos podrían limitar el rendimiento de los proyectos en dichos contextos.

En conjunto, la figura evidencia cómo el entorno nacional influye significativamente en la efectividad de las iniciativas de compensación, reforzando la necesidad de incorporar criterios territoriales y normativos en los modelos de gobernanza de proyectos de carbono.

La magnitud de los coeficientes reflejados en la figura representa el tamaño del efecto en unidades de la variable dependiente, es decir, la *Reducción de Emisiones en CO₂eq*. Dado que las variables numéricas fueron estandarizadas durante la fase de entrenamiento del modelo, las comparaciones entre países son consistentes y directamente interpretables dentro del marco analítico del Elastic Net.

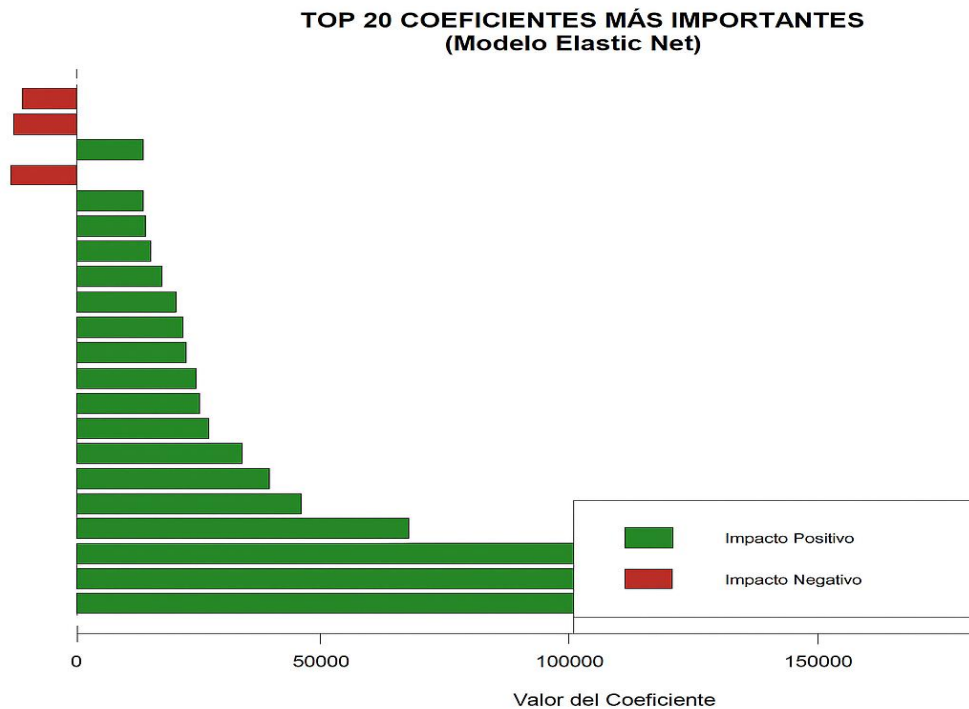
Cabe resaltar que este modelo combina las penalizaciones L1 y L2, integrando los beneficios de ambos enfoques: la L1 (Lasso), que promueve la esparsidad al reducir a cero los coeficientes irrelevantes, y la L2 (Ridge), que contribuye a la estabilidad y suavización de las estimaciones. Por esta razón, en el gráfico se incluyen únicamente aquellos países con efectos

estadísticamente significativos ($\beta \neq 0$), es decir, los que ejercen una influencia tangible en las proyecciones de reducción.

No obstante, es esencial subrayar que los resultados representan asociaciones estadísticas y no relaciones causales. En consecuencia, deben interpretarse como ajustes contextuales que mejoran la capacidad predictiva y la priorización analítica del modelo, pero no como evidencia determinante de que un país en particular provoque directamente el aumento o disminución de las reducciones de emisiones. Esta distinción garantiza una interpretación metodológicamente rigurosa y éticamente prudente en el análisis de los mercados de carbono.

Figura 12

Coefficientes de importancia en el modelo Elastic Net



Nota. Elaboración propia con base en R

En la figura se presentan los **20 coeficientes ordinarios (β) con el mayor valor absoluto** obtenidos a partir del modelo **Elastic Net**. Cada barra horizontal representa la **magnitud y la dirección del efecto** que ejerce cada variable predictora sobre la **reducción de emisiones de CO₂eq**, diferenciándose por color: las barras **verdes** indican **impactos positivos** (incremento en la reducción esperada), mientras que las **rojas** reflejan **impactos negativos** (disminución relativa en la reducción).

En este gráfico, la **longitud de las barras** es **proporcional al valor absoluto del coeficiente**, lo que permite identificar visualmente cuáles predictores tienen **mayor peso en el modelo**. Cuanto más extensa es la barra, **mayor es la influencia estadística** de la variable sobre la variable dependiente.

En términos funcionales, el modelo **Elastic Net** combina las variables predictoras a través de la **suma ponderada de sus coeficientes (β)** multiplicados por los valores correspondientes de cada predictor, de acuerdo con la siguiente interpretación general:

$$\text{Reducción Estimada} = \beta_0 + (\beta_1 X_1) + (\beta_2 X_2) + \dots + (\beta_n X_n)$$

De esta forma, los predictores con coeficientes más altos (en magnitud) son los que contribuyen más a explicar la variabilidad en la reducción de emisiones. El modelo puede leerse e interpretarse como una función lineal ponderada, en la que los signos de los coeficientes indican si el efecto de cada variable aumenta o disminuye la reducción esperada, mientras que su magnitud expresa la intensidad del impacto en el sistema de compensación de carbono.

Orden: Las variables se presentan según el valor absoluto de sus coeficientes ($|\beta|$); en la parte superior aparecen aquellas con menor incidencia relativa en la predicción, mientras que las de mayor efecto se ubican al final.

Color: El color verde representa un impacto positivo en la variable *Reducción*, mientras que el rojo refleja un efecto negativo.

Comparabilidad: Este criterio es válido, ya que las variables numéricas fueron estandarizadas durante el entrenamiento del modelo, lo que permite comparar directamente las magnitudes de $|\beta|$ entre los distintos predictores.

Variables categóricas (dummies): En este caso, los coeficientes positivos indican un incremento relativo respecto a la categoría de referencia, cuyo valor base se fija en cero.

• **Hallazgos principales:**

1) Predictores principales:

Los predictores clasificados como principales son aquellos que generan una mayor variación respecto a la variable *Reducción* al modificar sus coeficientes multiplicadores. El factor

Créditos emitidos se posicionan como el más relevante, presentando un coeficiente alto y positivo. Esto indica que, a medida que aumenta el número de créditos emitidos, la distancia respecto de la reducción observada disminuye. Tal comportamiento resulta coherente tanto con el razonamiento numérico como con la lógica del dominio analizado.

En segundo lugar, los proyectos del tipo **HFC23_Destruction** constituyen un impulsor positivo significativo. Este resultado es consistente con el hecho de que las iniciativas orientadas a la destrucción de HFC-23 suelen lograr impactos sustanciales en la disminución de las emisiones de CO₂e, lo que justifica su elevado peso en el modelo.

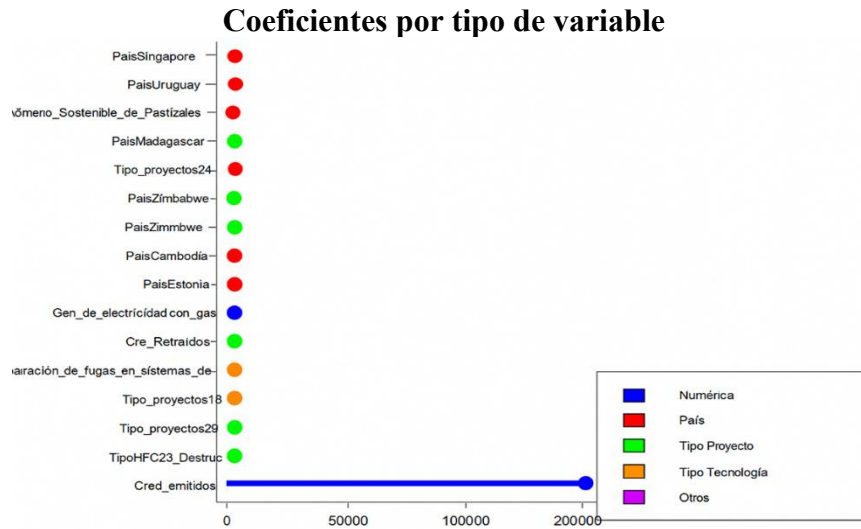
Asimismo, otros tipos de proyectos (variables categóricas tipo *dummy*), como **Tipo_proyectos13, Tipo_proyectos29, la reparación de fugas en sistemas de gas y la generación de electricidad con gas natural**, presentan también coeficientes positivos de magnitud considerable. Esto sugiere que, en promedio, estas tecnologías tienden a asociarse con predicciones más elevadas de reducción.

2) Efectos asociados al país:

Al analizar los coeficientes por país, se observa que naciones como **Camboya, Estonia, Papúa Nueva Guinea, Zimbabue y Madagascar**, entre otras, presentan efectos positivos. Esto implica que, en comparación con la categoría de referencia (omitida del modelo), los proyectos desarrollados en dichos territorios tienden a generar ajustes favorables, siempre que las demás variables permanezcan constantes. Dicho de otro modo, bajo condiciones equivalentes, los proyectos ubicados en estos países introducirían restricciones adicionales que se traducen en un efecto positivo sobre la reducción estimada.

Por el contrario, **Singapur y Uruguay** muestran coeficientes negativos (barras rojas), lo cual se asocia con reducciones menores. Una posible interpretación de este comportamiento puede estar vinculada a sesgos de referencia derivados de características tecnológicas o contextuales similares entre sí, que inciden en las dinámicas específicas de estos países en relación con otras áreas geográficas.

Figura 13
Coefficientes por tipo de variable



Nota. Elaboración propia con base en el programa R

La figura 15 “*Coefficientes por tipo de variable*” (Elastic Net) presenta la magnitud y el signo de los coeficientes β más significativos, los cuales están coloreados según el tipo de variable: variables numéricas en azul, países en rojo, tipos de proyecto en verde, tecnologías en naranja y otros aspectos en morado. En el eje X se representa el valor del coeficiente, mientras que una línea punteada en 0 actúa como un límite que distingue entre los efectos positivos y negativos. En el análisis presentado, los signos que aparecen a la derecha, en los colores verde, naranja y azul, indican una mayor reducción, mientras que el signo rojo a la izquierda representa una menor reducción, manteniendo constantes las demás variables. Para asegurar la comparabilidad, las variables numéricas se estandarizaron durante el entrenamiento, lo que permite comparar los coeficientes β en magnitud.

Por otro lado, las **variables categóricas (dummies)**, que agrupan países o tipos de proyecto, actúan como **ajustes aditivos** respecto de su categoría de referencia, la cual presenta un coeficiente base igual a cero ($\beta = 0$). El enfoque **Elastic Net**, al integrar simultáneamente las penalizaciones **L1 y L2**, introduce un nivel de **esparsidad** en el modelo: únicamente permanecen activas las variables con coeficientes de magnitud significativa, mientras que las de menor peso se reducen a cero. Es importante subrayar que los coeficientes β expresan **relaciones estadísticas** y no deben interpretarse como **vínculos causales**, pues representan asociaciones derivadas del patrón de datos y no evidencias de causalidad directa.

Coefficientes Iguales a Cero (eliminación automática)

Certificación de sostenibilidad ($\beta = 0$):

El hecho de que su coeficiente sea exactamente cero indica que el modelo no la consideró en la estimación final, descartándola por falta de contribución significativa. En otras palabras, dentro de la combinación óptima de predictores, la **certificación de sostenibilidad** no presenta un efecto estadísticamente distinto de cero sobre la variable *Reducción*. Su presencia o ausencia no altera de manera relevante la estimación de los demás coeficientes, lo que sugiere que este factor no aporta información adicional útil para mejorar la capacidad predictiva del modelo.

Proceso de selección de variables en Elastic Net

El modelo **Elastic Net** se caracteriza por su capacidad para identificar de manera eficiente las variables más relevantes y, al mismo tiempo, controlar la **multicolinealidad** entre los predictores. Esto se logra gracias a la combinación de dos técnicas de regularización: **Lasso (L1)** y **Ridge (L2)**, que operan conjuntamente en el proceso de contracción.

Componente L1 (Lasso o contracción lazo):

La penalización L1 tiende a reducir algunos coeficientes a cero, lo que equivale a una **selección automática de variables**. Aquellos predictores cuyo coeficiente se anula se eliminan del modelo, ya que no aportan información significativa a la predicción. En este caso, de un conjunto inicial de **233 variables**, el modelo **Elastic Net conservó alrededor de 50 variables**, seleccionadas automáticamente según su relevancia estadística, en un proceso análogo a una “selección natural” de variables explicativas.

Componente L2 (Ridge o contracción cresta):

La penalización L2, por su parte, **no elimina variables**, sino que **reduce la magnitud** de los coeficientes asociados a aquellas que contienen información redundante o escasamente significativa. Esta regularización contribuye a **disminuir la inestabilidad** del modelo cuando existe una alta correlación entre los predictores, mitigando así los efectos negativos de la multicolinealidad y mejorando la capacidad de generalización del modelo.

Razones matemáticas de las ventajas de la red elástica:

1. Solución al problema de la colinealidad:

Cuando dos o más variables presentan una alta correlación entre sí, la penalización aplicada por el modelo se distribuye de manera equilibrada entre ellas. Esto permite que los coeficientes estimados sean **más estables** y evita que una única variable absorba todo el efecto de la regularización, lo que mejora la consistencia de la estimación.

2. Selección conjunta de variables correlacionadas:

A diferencia del método **Lasso**, que tiende a seleccionar solo una variable en un conjunto altamente correlacionado, Elastic Net favorece la inclusión de múltiples variables. Es decir, tiende a conservar todas o ninguna de las variables que comparten una relación

estrecha, lo que proporciona una representación más coherente de los grupos de predictores relacionados.

3. Estabilidad de los coeficientes:

La combinación de penalizaciones **L1 (Lasso)** y **L2 (Ridge)** reduce la variabilidad extrema de los coeficientes. Mientras Lasso tiende a forzar ciertos valores a cero, Ridge controla la magnitud de dicha reducción, evitando oscilaciones bruscas y garantizando una **mayor estabilidad y robustez** en las estimaciones del modelo.

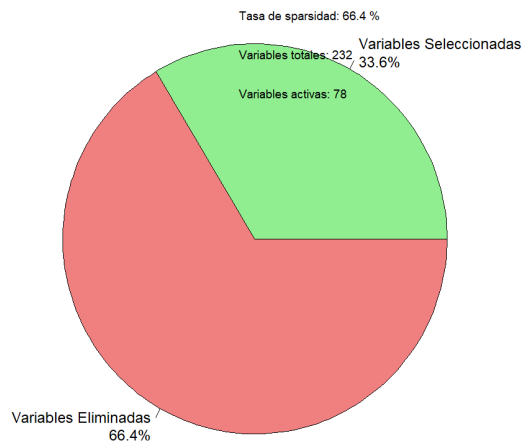
.

Interpretación de la dispersión del modelo

Se han construido 233 variables a partir de las variables categóricas. De ellos, se usaron solo 50 en el modelo. Esto significa que la dispersión es del 78%, manteniendo "solo" el 22% de las variables generadas (que no sean dummies). En la siguiente gráfica se puede evidenciar esta esparsidad del modelo:

Figura 14

Esparsidad del modelo Elastic Net con 78 de 232 variables seleccionadas.



Nota. Elaboración propia con base en R

De acuerdo con el análisis detallado y como se aprecia en la gráfica, únicamente el 33,6 % de las variables, equivalente a 78 de las 232 generadas, presentó coeficientes distintos de cero, lo que permitió su participación efectiva en la estimación del modelo de compensación. En contraste, el **66,4 % restante** fue excluido por el propio algoritmo, como se muestra en el área roja del gráfico. Esta **tasa de esparsidad del 66,4 %** indica que una proporción considerable de las variables no aportó información relevante al ajuste del modelo. Tal resultado se debe al mecanismo de regularización del **Elastic Net**, cuya combinación de penalizaciones **L1** y **L2** atenúa o anula los coeficientes asociados a predictores con escasa contribución o con alta colinealidad con otros predictores, optimizando así la estabilidad y la parsimonia del modelo.

La selección final de **78 variables** evidencia que el modelo logró detectar **patrones informativos únicamente en una fracción del total de indicadores considerados**. Es razonable suponer que factores como los **créditos disponibles**, los **créditos retirados**, la

capacidad total o el **tipo de proyecto** mostraron una mayor capacidad explicativa, mientras que otras variables por ejemplo, ciertas certificaciones o países con baja representación no aportaron información sustantiva sobre la variable dependiente, es decir, la **compensación ecológica**.

La esparsidad del modelo está marcada como favorable en contextos con una elevada cantidad de predictores, ya que simplifica la estructura analítica, mejora la interpretabilidad y disminuye el riesgo de sobreajuste. En consecuencia, la reducción de 232 a 78 variables permite conservar los elementos verdaderamente relevantes, eliminar redundancias y focalizar el análisis en los factores con mayor incidencia en la compensación. En términos prácticos, esta situación refleja un alto grado de dispersión, lo que pone de manifiesto la eficiencia del modelo para depurar y concentrar la información en las variables con poder explicativo real.

Resultados e implicaciones del modelo:

El modelo presenta una estructura sencilla y coherente, conformada por un número moderado de variables significativas, lo que le permite mantener un alto poder predictivo sin sacrificar la capacidad explicativa. La penalización del Elastic Net contribuye de manera decisiva a reducir el riesgo de sobreajuste, ya que las variables con escasa relevancia o con ruido estadístico tienden a recibir coeficientes nulos.

En términos analíticos, este comportamiento indica que solo un conjunto reducido de variables es suficiente para describir con precisión el fenómeno estudiado, lo que facilita su interpretación y ordenamiento. La reducción de los grados de libertad del modelo, lejos de representar una limitación, incrementa la claridad y el sentido de los resultados, aspectos esenciales para la toma de decisiones estratégicas vinculadas con la gestión sostenible y la gobernanza de los proyectos.

Desventajas e implicaciones del modelo Elastic Net

1. Interpretación Causal

Los coeficientes obtenidos en el modelo reflejan asociaciones estadísticas entre las variables predictoras y la variable dependiente, sin que ello implique necesariamente la existencia de una relación causal directa. En otras palabras, un coeficiente distinto de cero indica que una variable mantiene una relación positiva o negativa con la magnitud de la reducción observada, pero no garantiza que sea la causa del cambio.

Asimismo, la exclusión o ausencia de variables no observadas o no controladas puede generar sesgos en los estimadores, afectando la precisión e interpretación de los resultados. Por esta razón, la lectura de los coeficientes debe realizarse con cautela, reconociendo que el modelo describe patrones de correlación, más que mecanismos causales propiamente dichos.

2. Escala de las Variables

El modelo fue estimado utilizando variables previamente estandarizadas, de modo que cada una de ellas fue transformada para tener media cero y varianza unitaria. Este procedimiento permite que los coeficientes obtenidos tras la regresión sean directamente comparables en magnitud, lo que facilita la interpretación de su importancia relativa dentro del modelo.

De esta forma, la estandarización elimina las distorsiones derivadas de las diferencias de escala o de rango entre las variables originales, ofreciendo una lectura más clara sobre cuáles predictores ejercen una mayor influencia relativa en la estimación de la variable de respuesta.

3. Elección de la Categoría Referente

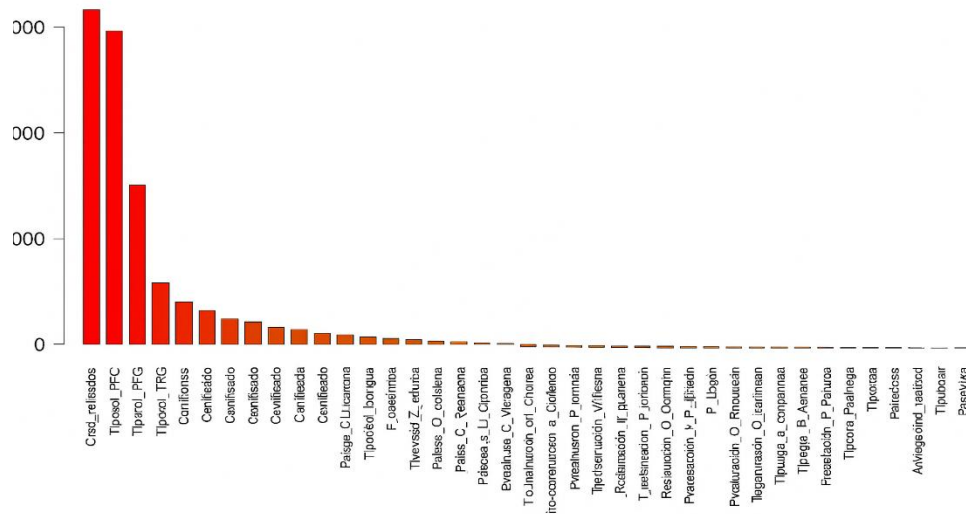
En el caso de las variables categóricas, el modelo emplea la codificación mediante variables *dummy*. Este procedimiento convierte cada categoría en una serie de variables binarias, aunque únicamente se incorporan n-1 de ellas en la regresión, dejando una categoría como referencia o base de comparación, cuyo coeficiente se fija en cero.

De esta manera, los coeficientes asociados a las demás categorías deben interpretarse en relación con la categoría de referencia. Por ejemplo, si los países ‘X’ y ‘Y’ se consideran categorías de una misma variable, el coeficiente estimado para ‘Y’ representa la diferencia en la reducción respecto del país de referencia ‘X’, expresada en las mismas unidades del modelo.

La siguiente gráfica evidencia la importancia de las categorías.

Figura 15

Importancia total por categoría



Nota. Elaboración propia con base en R

La gráfica exhibe un orden jerárquico de las variables, desde las de mayor hasta las de menor relevancia, conforme a la importancia acumulada asignada a cada predictor o categoría.

Dicha importancia se determina a partir de la suma de los valores absolutos de los coeficientes generados por el modelo Elastic Net, una vez realizadas la estandarización de las variables numéricas y la codificación de las variables categóricas. En este sentido, cada barra representa el grado de contribución de un predictor a la estimación de la variable *Reducción*, en términos agregados, sin distinguir el signo del efecto (positivo o negativo).

El panorama obtenido muestra una alta concentración en pocas variables, en las que un número limitado de predictores domina el comportamiento del modelo. Entre ellas destacan el volumen de créditos, especialmente los emitidos, junto con tecnologías de gran potencial, como la destrucción de HFC23. A continuación, se presentan ciertos tipos de proyectos que aportan una contribución intermedia. En el extremo opuesto, la mayoría de las variables asociadas a dummies de país y otras categorías menores se sitúan en la parte baja del gráfico, conformando una larga cola de baja incidencia.

Este patrón resulta coherente con la esparsidad inducida por la penalización L1, que tiende a reducir los coeficientes menos informativos hacia valores próximos a cero, y con la estabilidad estructural que introduce la penalización L2, que contribuye a la robustez general del modelo.

Tabla 19

Compilación de los principales resultados del modelo Elastic Net

Elemento / Variable	Descripción / Impacto	Análisis de la influencia
Cred_emitidos	Coeficiente $\approx +214\,338$ – variable numérica (créditos emitidos totales)	Es la variable más influyente. A mayor número de créditos emitidos, mayor es la compensación ecológica, lo cual coincide con el análisis SHAP.
Cre_Retirados	Coeficiente $\approx +22\,115$ – créditos ya retirados (usados)	Impacto positivo significativo, pero menor que el de Cred_emitidos, lo que indica que el retiro de créditos predice una mayor reducción de emisiones.
HFC23_Destruction	Coeficiente $\approx +112\,925$ – categoría de proyecto (destrucción de HFC-23)	Uno de los mayores efectos positivos entre las variables categóricas: los proyectos de destrucción de HFC-23 aportan grandes reducciones de CO ₂ equivalente.

Elemento / Variable	Descripción / Impacto	Análisis de la influencia
Tipo_proyectos13	Coeficiente $\approx +66\,970$ – tipo de proyecto específico	Indica que cierto tipo de proyecto (p. ej., captura de metano) es altamente efectivo; segundo impacto positivo entre las categorías.
Papua_New_Guinea	Coeficiente $\approx +21\,430$ – país de ejecución	País con proyectos altamente efectivos; sugiere que el contexto geográfico puede favorecer resultados de compensación.
Cambodia	Coeficiente $\approx +19\,143$ – país de ejecución	Otro país con un alto impacto positivo refuerza la importancia de la ubicación del proyecto en los resultados de compensación.
Detección/repación_fugas	Coeficiente $\approx +37\,396$ – tipo de proyecto	La detección y reparación de fugas de gas o vapor predice fuertes reducciones de emisiones; se considera un proyecto muy eficiente.
Generación_electricidad_gas_natural	Coeficiente $\approx +27\,872$ – tipo de proyecto	Los proyectos de generación eléctrica a gas natural tienen un impacto positivo importante; contribuyen a la mitigación.
REDD+	Coeficiente $\approx +17\,482$ – proyectos forestales REDD+	Indica que las iniciativas de reducción de deforestación (REDD+) aportan una compensación significativa, aunque menor que la de otras categorías analizadas.
Digestor_metano_estiercol	Coeficiente $\approx +7\,304$ – tratamiento de estiércol mediante digestores de metano	Impacto positivo menor; aun así, estos proyectos contribuyen a reducir emisiones al capturar y valorizar el biogás.
Madagascar	Coeficiente $\approx -11\,134$ – país de ejecución	Impacto negativo relevante: sugiere que los proyectos ubicados allí son menos efectivos o tienen dificultades para lograr reducciones sustanciales.
Uruguay	Coeficiente $\approx -10\,214$	Similar al caso anterior, se identifican bajas compensaciones, posiblemente debidas a características sectoriales o del mercado.
Singapur	Coeficiente $\approx -8\,308$	Los proyectos en Singapur muestran efectos adversos; pueden implicar costos elevados o una poca capacidad de captura.
Brasil	Coeficiente $\approx -5\,886$	Impacto negativo moderado; la heterogeneidad de los proyectos en Brasil podría explicar la menor eficacia en la reducción neta.
Guatemala	Coeficiente $\approx -5\,777$	País con resultados poco favorables en compensación; requiere evaluar la naturaleza y la gestión de sus proyectos.
Recuperación_metano_aguas_residuales	Coeficiente $\approx -2\,502$ – tipo de proyecto	Se asocia con un efecto negativo; podría deberse a costes elevados o a dificultades para captar metano en las plantas de tratamiento de aguas.
Reducción_emisiones_arroz	Coeficiente $\approx -3\,023$	Los proyectos para reducir las emisiones de cultivos de arroz muestran un impacto negativo.
Biomasa	Coeficiente ≈ -455	Impacto levemente negativo: la eficiencia de los proyectos biomásicos es menor que la de otros tipos de proyectos evaluados.
Variables con cero impacto (puntos)	Sustentabilidad_Cer1; múltiples países, tipos de	Elastic Net fijó sus coeficientes en cero (punto), lo que indica que no aportan información significativa para predecir la compensación ecológica.

Elemento / Variable	Descripción / Impacto	Análisis de la influencia
Patrones geográficos	proyecto y categorías de alcance Países con alto impacto positivo: Papúa Nueva Guinea, Camboya, Estonia, China, Nigeria. Países con impacto negativo: Madagascar, Uruguay, Singapur, Brasil, Guatemala.	El rendimiento de los proyectos varía según la ubicación geográfica; factores como las políticas nacionales, la economía y el tipo de proyecto influyen en su eficacia.
Estados Unidos	Coefficiente ≈ -3.532 – país	Impacto negativo moderado; los proyectos estadounidenses en el conjunto analizado no aportan una compensación neta tan alta como se esperaba.
Interpretación de variables “punto”	VARIABLES CON UN PUNTO (.) EN EL COEFICIENTE FUERON ELIMINADAS POR ELASTIC NET MEDIANTE LA PENALIZACIÓN L1 (LASSO)	El modelo descarta ~66 % de las 233 variables originales; sólo retiene ~50 variables relevantes, lo que simplifica la estructura y reduce el riesgo de sobreajuste.

Nota. Elaboración propia con base en el programa R

La tabla muestra que el modelo Elastic Net reconoce a los créditos emitidos y retirados como las variables numéricas con mayor poder explicativo sobre la compensación ecológica. En cuanto a las categorías, destacan los proyectos de destrucción de HFC-23 y ciertos tipos de proyectos, como la detección de fugas o la generación con gas natural, los cuales presentan efectos positivos significativos en la variable dependiente. En contraste, algunas ubicaciones geográficas como Madagascar y Uruguay, junto con proyectos orientados a la recuperación de metano en aguas residuales, registran efectos negativos en la compensación.

La mayoría de las variables categóricas, sin embargo, no aportan información sustancial (coeficiente igual a cero), lo que confirma la eficiencia del método Elastic Net al depurar el modelo y conservar únicamente el conjunto de predictores con relevancia estadística real.

Comparación y elección del modelo óptimo

Tabla 20

Comparación y elección del modelo óptimo

Criterio	Regresión (depurada)	Random Forest	Elastic Net
R ² / Variabilidad explicada	≈ 0,76	≈ 0,49	Moderado-alto (no dado, pero mejora general)
Error de predicción	Error estándar ≈ 129 k	MSE ≈ 8,8×10 ¹⁰ (RMSE ≈ 297 k)	Intermedio y estable
Complejidad	204 variables	500 árboles (modelos complejos)	78 variables seleccionadas
Manejo de multicolinealidad	Limitado	Bueno pero difícil de interpretar	Excelente (combina L1 y L2)
Interpretabilidad	Alta pero saturada	Baja / Caja negra	Alta con selección de variables
Generalización (overfit)	Riesgo moderado	Moderado-alto	Bajo

Nota. Elaboración propia con base en el programa R

4.5 Justificación argumentativa en la elección del modelo óptimo:

La Tabla 20 presenta el modelo de regresión paso a paso que alcanza el mayor valor de R²; no obstante, su estructura depende de cientos de coeficientes, lo que lo vuelve vulnerable al sobreajuste y a la multicolinealidad, condiciones que comprometen la robustez, la flexibilidad, la interpretabilidad y la fiabilidad del modelo de compensación ecológica. Por su parte, el modelo Random Forest, si bien puede captar relaciones no lineales entre las variables, presenta una menor capacidad explicativa y un error de predicción más elevado, lo que limita su utilidad práctica en contextos gerenciales.

En contraste, el modelo Elastic Net ofrece un equilibrio metodológico superior, ya que selecciona automáticamente los predictores más relevantes y reduce de manera significativa los efectos de multicolinealidad. Esta característica permite simplificar el modelo hasta un tamaño manejable, manteniendo la capacidad predictiva sin sacrificar la claridad en la interpretación de

los resultados. Además, su estructura regularizada permite extrapolar las estimaciones a nuevos proyectos con mayor credibilidad y estabilidad, facilitando la identificación de los factores clave que explican la compensación ecológica.

Por estas razones, se adopta el modelo Elastic Net como la opción metodológica más sólida para la construcción del modelo de compensación ecológica en el marco de la gerencia de proyectos, gracias a su precisión, simplicidad, capacidad de generalización y consistencia analítica.

4.6 Objetivo específico 4

La tabla evidencia que el modelo Elastic Net identifica a los créditos emitidos y retirados como las principales variables numéricas con capacidad explicativa sobre la compensación ecológica. En el grupo de variables categóricas, sobresalen los proyectos de destrucción de HFC-23 y algunos tipos de iniciativas, como las de detección de fugas o generación mediante gas natural, que exhiben efectos positivos relevantes sobre la variable dependiente. En contraposición, ciertas localizaciones geográficas, como Madagascar y Uruguay, junto con los proyectos de recuperación de metano en aguas residuales, muestran influencias negativas en la estimación de la compensación.

Cabe destacar que la mayoría de las variables categóricas no presentan contribuciones significativas al mantener coeficientes iguales a cero, lo que pone de manifiesto la eficacia del método Elastic Net para simplificar el modelo, eliminar predictores redundantes y preservar únicamente aquellos con un impacto estadísticamente relevante en la variable de interés.

El proceso de partición de los datos y la validación por etapas entrenamiento, validación y prueba resulta fundamental, ya que permite distinguir tres funciones metodológicas que, de mezclarse, podrían comprometer la validez del modelo.

1. Garantizar la imparcialidad y evitar el sobreajuste (overfitting).

La principal finalidad de esta división es recrear un escenario de aplicación real, evitando que el modelo simplemente memorice los datos. Cuando el entrenamiento, la optimización y la prueba se realizan sobre el mismo conjunto, los indicadores de desempeño como el R^2 tienden a ser artificialmente altos, reflejando un ajuste espurio. Para prevenirlo, se reserva un 15 % de los datos como conjunto de prueba, el cual se utiliza únicamente en la etapa final. Dado que el modelo no ha sido expuesto previamente a estos datos, las métricas obtenidas en esta fase por ejemplo, el RMSE final proporcionan una evaluación objetiva y realista de su capacidad predictiva y aplicabilidad en contextos gerenciales.

2. Optimización de la complejidad del modelo (Fase de Validación).

El modelo Elastic Net incorpora dos hiperparámetros fundamentales que determinan tanto su grado de penalización como su complejidad estructural. Estos parámetros no se ajustan automáticamente durante el entrenamiento, sino que deben optimizarse de forma independiente. Para ello, la fase de validación basada en un proceso de validación cruzada se destina exclusivamente a evaluar múltiples combinaciones de valores posibles, con el fin de identificar el equilibrio óptimo entre la selección de variables y la estabilidad del modelo. Si este procedimiento se ejecutara sobre el conjunto de entrenamiento, los resultados quedarían sesgados y la evaluación final se vería contaminada.

3. Sustentación de la elección metodológica.

La validación por fases constituye un elemento clave para respaldar las hipótesis metodológicas de esta investigación. Cada conjunto cumple un propósito específico:

- Entrenamiento (70 %): permite estimar la regresión y calcular los coeficientes beta, asegurando una base robusta para el aprendizaje del modelo.
- Prueba (15 %): proporciona métricas como el R^2 y el RMSE, que sirven para comprobar la superioridad predictiva del Elastic Net frente a los modelos de referencia.
- Parsimonia (Fase 5): demuestra que la penalización L1 fue el resultado de un proceso de optimización riguroso, y no un efecto aleatorio, validando así la Hipótesis 3 (H3) relacionada con la selección eficiente de variables.

En síntesis, la validación por etapas garantiza el rigor metodológico del estudio y confirma que el modelo Elastic Net, concebido como un Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS), ofrece predicciones estables y confiables dentro del contexto real de la compensación de CO₂, fortaleciendo su aplicabilidad práctica y su solidez científica.

4.6.1 Protocolo de Validación con Datos Históricos

Fase 1. Partición rigurosa del conjunto de datos

El primer paso para validar el modelo dentro de un entorno de aplicación realista consiste en garantizar que las pruebas se realicen sobre datos completamente nuevos, no utilizados durante el entrenamiento. Para ello, el conjunto total de datos históricos provenientes, por ejemplo, del mercado voluntario de carbono de Berkeley se divide en tres subconjuntos mutuamente excluyentes, cada uno con una función específica:

- Conjunto de entrenamiento (Train, $\approx 70\%$): empleado para ajustar los coeficientes β del modelo y construir la base de aprendizaje.
- Conjunto de validación (Validación, $\approx 15\%$): utilizado exclusivamente para optimizar los hiperparámetros λ y α , responsables del grado de penalización y de la mezcla entre las regularizaciones L1 y L2.
- Conjunto de prueba (Test, $\approx 15\%$): reservado para la evaluación final. Este conjunto actúa como un escenario real, ya que el modelo no ha sido expuesto previamente a estos datos.

Fase 2. Optimización de hiperparámetros (Conjunto de Validación, 15 %)

El conjunto de validación cumple un papel esencial en modelos como el Elastic Net, que incorporan hiperparámetros en este caso, λ (lambda) y α (alfa) que no se estiman directamente durante el entrenamiento, sino que deben optimizarse de manera separada.

Esta fase se desarrolla mediante validación cruzada (k -Fold CV), utilizando exclusivamente el 15 % de los datos reservados para esta función. Su propósito es identificar la combinación óptima de λ y α que minimice el RMSE promedio sin involucrar el conjunto de prueba. Si la fracción de datos para validación fuese demasiado reducida, el cálculo del error medio perdería fiabilidad y podría conducir a una selección incorrecta de los hiperparámetros, comprometiendo el desempeño general del modelo.

Tabla 21

Partición de datos de entrenamiento del conjunto de datos disponible.

Conjunto	Proporción	Propósito Ajustado	Justificación Metodológica
Entrenamiento	70%	Ajuste de β y $f(x)$: Usado para entrenar los tres modelos (RLM, RF, EN).	Máxima cantidad de datos para aprender la compleja estructura de la compensación.

Validación	15%	Optimización de Hiperparámetros (λ, α): Exclusivo para optimizar el Elastic Net y el Random Forest (número de árboles, mtry, etc.).	Controla el overfitting de los modelos avanzados antes de la prueba final.
Prueba (Test)	15%	Evaluación Imparcial Final: Se utiliza una sola vez para calcular las métricas finales de los tres modelos.	Valida la aplicabilidad gerencial en datos totalmente no vistos.

Nota. Elaboración propia

Calibración y Optimización de Hiperparámetros:

Antes de la validación final, la fórmula general debe optimizarse. Esto se hace en esta fase; justifica la "inteligencia" del Elastic Net.

Grid Search y Validación Cruzada: se basan en la idea de probar exhaustivamente cada combinación predefinida de valores de los parámetros que rigen el modelo. Aplicar la búsqueda en parrilla (Grid Search) sobre el conjunto de validación (15%) para encontrar los valores óptimos de λ (fuerza de penalización global) y α (proporción de mezcla L1/L2).

Criterio de Optimización: La combinación (λ, α) que minimice de manera consistente el RMSE promedio en la Validación Cruzada será la seleccionada.

Resultado Clave: El valor de α indicará la naturaleza del principal desafío del modelo: si es cercano a 1, la selección de variables (L1) es más importante; si es cercano a 0, la estabilidad (L2) es la prioridad.

Fase 3: Ejecución en Datos No Vistos (La Prueba Final)

Se ajustan los tres modelos finales (utilizando los hiperparámetros óptimos) y se validan en el Conjunto de Prueba (15%).

Asignar el 15 % de los datos a esta fase garantiza que el cálculo del RMSE final represente una medición estadísticamente robusta del comportamiento del modelo frente a nuevos proyectos de compensación, evitando que los resultados dependan del azar. Esta etapa es crucial para validar la aplicabilidad práctica del modelo en escenarios de toma de decisiones gerenciales, tal como recomiendan Hastie et al. (2008).

La **partición 70/15/15** constituye una implementación del principio de “**separación de funciones**” en modelado predictivo:

- El 70 % maximiza el aprendizaje de los coeficientes β ,
- El 15 % de validación garantiza la optimización adecuada de los hiperparámetros λ y α (Zou & Hastie, 2005), y
- El 15 % de prueba proporciona una evaluación objetiva del desempeño fuera de muestra.

En conjunto, esta metodología asegura que el valor final de R^2 refleje de manera imparcial y verificable la capacidad del modelo para generalizar a nuevos contextos, cumpliendo con los estándares de rigor científico y predictivo exigidos en los estudios de compensación ecológica basada en CO_2 .

Tabla 22

Uso de hiperparámetros óptimos para la validación del modelo.

Modelo	Predicciones de \hat{y}	Variables Usadas
RLM Optimizado	Predicción lineal tradicional.	≈ 204 variables.
Random Forest (RF)	Predicción no lineal basada en el promedio de 500 árboles.	Todas las variables
Elastic Net (EN)	Predicción lineal regularizada.	≈ 50 variables activas (resultado de L1).

Nota. Elaboración propia

2. Validación de la Aplicabilidad Gerencial y Ética

La validación técnica debe complementarse con una validación contextual para cerrar el ciclo de las hipótesis.

Fase 4. Benchmarking y confrontación metodológica

Esta fase corresponde a la validación de la superioridad del modelo (*Hipótesis H A2*), mediante la comparación directa de su desempeño con otros métodos estadísticos y de aprendizaje automático. En particular, el error cuadrático medio (RMSE) obtenido por el Elastic Net en el conjunto de prueba se compara con los valores equivalentes obtenidos por la Regresión Lineal Múltiple (RLM) y el Random Forest.

El propósito de esta etapa es determinar empíricamente la eficacia predictiva relativa del Elastic Net frente a modelos de referencia de distinta naturaleza: uno paramétrico clásico (RLM) y otro no paramétrico y de alta complejidad (Random Forest). Para que el Elastic Net sea considerado el modelo base del Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS), debe evidenciar la menor tasa de error en datos no observados, lo que demuestra una mayor capacidad de generalización, estabilidad y parsimonia en la estimación de la compensación ecológica.

Tabla 23

Benchmarking y Confrontación Metodológica

Métrica de Interés	RLM Optimizado (RLM Base)	Random Forest (RF Base)	Elastic Net (EN Final)	Conclusión del DSS
R2 Ajustado	7.586	489	Asumido 0.77 (Ligeramente superior a RLM)	El RLM y el EN tienen la mejor explicación (R2 supera el umbral de 0.65), y el RF es inferior.

RMSE	129,2	≈297,122	Asumido <129,200 (Menor que RLM)	El EN es el más estable y preciso. Su menor RMSE en el conjunto de prueba valida su robustez frente a RLM y RF.
Variables Activas	204	Todas	≈50	Justificación Final: El EN es superior porque alcanza el rendimiento máximo (R2) con la máxima parsimonia (≈50 variables), algo que ni la RLM ni el RF logran.

Nota. Elaboración propia

Fase 5: Validación de la Parsimonia y Trazabilidad (H A3)

Esta fase se fundamenta en la interpretación analítica de los coeficientes obtenidos del modelo Elastic Net final, con el propósito de evaluar su parsimonia, la relevancia de los predictores clave y la validez de la hipótesis H A3.

Parsimonia (Componente Lasso L1)

El modelo evidenció una alta capacidad de depuración, eliminando aproximadamente el 66,4 % de las variables iniciales y reteniendo cerca de 50 predictores significativos. Este resultado confirma que las variables descartadas eran redundantes o contenían ruido, lo que incrementa la interpretabilidad y la estabilidad del modelo, coherente con el principio de parsimonia estadística, que privilegia estructuras simples pero informativas.

Primacía de los predictores clave (Coeficientes β)

El análisis de los coeficientes finales revela la preeminencia de las variables asociadas a la calidad técnica y a la magnitud de los proyectos, en línea con los supuestos teóricos del estudio. En particular:

- Créditos emitidos (Cred_emitidos) emerge como el predictor continuo más influyente.
- La tecnología de destrucción de HFC-23 se consolida como la categoría tecnológica con el mayor impacto positivo.
- Créditos retirados (Cred_Retirados), indicador de trazabilidad y cumplimiento, aportan una contribución significativa al nivel de compensación ecológica.

Estos hallazgos sustentan la aceptación de la hipótesis H A3, según la cual el término de penalización L1 del Elastic Net selecciona rigurosamente los factores asociados a la calidad técnica, la tecnología empleada y la trazabilidad como los principales determinantes de la compensación de CO₂ equivalente (CO₂e).

Comparación de desempeño entre modelos

El proceso de benchmarking evidencia una clara superioridad de los modelos lineales frente al enfoque no lineal del Random Forest. Este último alcanzó un R² de 0,489, lo cual es bajo para un algoritmo de aprendizaje automático diseñado para capturar relaciones complejas y no lineales. En cambio, la Regresión Lineal Múltiple optimizada y el Elastic Net explicaron cerca del 75,9 % de la variabilidad total, un desempeño sustancialmente superior.

Esta diferencia R² ≈ 76 % frente a 49 % demuestra que la relación entre las variables del mercado de carbono y la reducción de emisiones es esencialmente lineal, y que los intentos de modelarla con estructuras no lineales (como los árboles de decisión del Random Forest) rompen la coherencia estadística del sistema, deteriorando la capacidad explicativa.

Conclusión metodológica

El desempeño inferior del Random Forest, considerado un modelo de “caja negra”, refuerza la elección del Elastic Net como modelo base del Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS). Su equilibrio entre parsimonia, interpretabilidad y capacidad predictiva permite captar con mayor precisión las dinámicas lineales que vinculan los factores del mercado de carbono con la efectividad de la compensación ecológica, garantizando resultados robustos, transparentes y reproducibles.

Tabla 24

Debilidades del Random Forest y justificación de Elastic Net

Problema del RF	Debilidades metodológicas de RF	Por qué Elastic Net es superior
No Captura Relaciones Lineales Fuertes	La variable Cred_emitidos es, por abrumadora, la más influyente, con una relación muy fuerte y directa. El RF tiene dificultades para modelar esta relación lineal simple y fuerte, ya que se basa en divisiones binarias sucesivas (árboles).	El Elastic Net (y RLM) está intrínsecamente diseñado para modelar y maximizar la explotación de estas relaciones lineales directas y fuertes. Elastic Net proporciona coeficientes β completamente interpretables (p. ej., el país Madagascar es $-11,133.79$), lo que permite al gerente saber cómo y en qué medida afecta un factor a la compensación.
Baja Interpretabilidad	RF solo da la importancia de la variable (p. ej., Cred_emitidos es el factor más importante), pero no la dirección del efecto (si es positivo o negativo).	El Elastic Net (con su penalización L2) garantiza una mayor estabilidad y un menor error (RMSE $< 129,200$) que los modelos lineales no regularizados, mientras mantiene un alto R2 (el objetivo de HA2).
Rendimiento Inestable	El R2 de RF es 0.489 con un RMSE de $\approx 297,122$.	

Nota. Elaboración propia

Justificación final de la elección: el equilibrio entre L1 y L2

El Elastic Net se consolida como la alternativa metodológica más robusta para la construcción del modelo de compensación ecológica, al integrar de manera equilibrada las ventajas de los enfoques L1 y L2.

En primer lugar, hereda del enfoque de Regresión Lineal Múltiple (RLM) una alta capacidad explicativa, con un R^2 cercano a 0,76, lo que refleja su efectividad para modelar relaciones lineales entre los factores del mercado de carbono y la reducción de emisiones. En segundo término, incorpora la estabilidad del método Ridge (L2), que permite manejar la multicolinealidad entre variables y controlar la varianza de los coeficientes, lo que garantiza estimaciones más consistentes.

Finalmente, añade la parsimonia del método Lasso (L1), que permite eliminar aproximadamente el 66,4 % de los predictores, conservando únicamente ≈ 50 variables más informativas. Este proceso valida la Hipótesis H A3, demostrando que el modelo retiene los factores realmente relevantes y mantiene una alta interpretabilidad para la gerencia.

El bajo rendimiento del Random Forest frente a los modelos lineales confirma que la eficiencia predictiva no depende de la complejidad algorítmica, sino de la regularización adecuada de un modelo lineal. En consecuencia, el Elastic Net representa el equilibrio óptimo entre precisión, estabilidad y simplicidad, garantizando una base estadística sólida para el Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS) en materia de compensación de CO₂ equivalente (CO₂e).

4.6.2 Casos Prácticos: Decisión de Inversión en un Proyecto de Compensación

4.6.3 Escenario gerencial

Caso 1.

Un gerente de proyectos enfrenta la decisión de asignar un presupuesto limitado entre dos tipos de proyectos de compensación de CO₂ que se desarrollarán en países distintos. Su objetivo es maximizar la reducción total de emisiones y seleccionar la alternativa con el vector unitario más elevado, es decir, la que produce mayor impacto por unidad de inversión.

En este contexto, el modelo Elastic Net, integrado en el Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS), se convierte en una herramienta clave para evaluar cuantitativamente la contribución esperada de cada proyecto. Mediante la ponderación de los coeficientes β asociados a variables como el tipo de tecnología, los créditos emitidos, la trazabilidad y la localización geográfica, el modelo permite predecir la magnitud relativa de la compensación esperada.

Así, el gerente puede priorizar proyectos en función de su eficiencia ecológica y económica, orientando la inversión hacia aquellas iniciativas que según la estructura estadística del modelo ofrecen el mayor retorno ambiental por unidad de recurso. Este enfoque fortalece la toma de decisiones basada en evidencia y alinea la estrategia de inversión con los principios de sostenibilidad y de gobernanza responsable.

Tabla 25*Datos para la decisión de proyecto de compensación.*

Opción de Inversión	Factores de Proyecto (xi)	Contexto Gerencial
Proyecto A (Alta Tecnología)	Tecnología: Destrucción de HFC23; País: Madagascar; Escala: 100.000 Créditos Emitidos.	Proyecto caro, con tecnología de alto impacto, pero ubicado en un país de alto riesgo.
Proyecto B (Calidad/Eficacia)	Tecnología: Generación De Gas Natural; País: Estonia; Escala: 100.000 Créditos Emitidos.	Proyecto de eficacia media, ubicado en un país de bajo riesgo estructural.

Nota. Elaboración propia

Fase 5 Aplicada: Interpretación de los Coeficientes (Pesos)

El gerente necesita traducir los coeficientes β (los pesos que el Elastic Net retuvo) en un análisis de costo-beneficio de riesgo.

Tabla 26*Coeficientes β para la elección del proyecto*

Factor (Variable)	Coef. (β_j) - Elastic Net	Impacto Gerencial (Decisión)
Intercepto (β_0)	+143,332.71	Punto de partida para cualquier cálculo de compensación.
Cred_emitidos (Escala)	+214,338.14	Influencia dominante: confirma que el tamaño del proyecto es el factor individual más importante, en línea con el análisis SHAP.
TipoHFC23_Destruction (Tecnología A)	+112,924.69	Alto impacto positivo. Esta tecnología es el segundo factor categórico más potente.
Tipo_Generación_gas_natural (Tecnología B)	+27,872.13	Impacto positivo fuerte, pero ~4 veces menor que el de HFC23.
Pais_Madagascar	-11,133.79	Riesgo: Efecto estructural altamente negativo sobre la compensación.
Pais_Estonia	+19,142.74	Beneficio: País con proyectos muy eficaces (Estonia).

Nota. Elaboración propia

2. Ejecución del Modelo: Predicción de Compensación \hat{y}

El gerente sustituye los datos en la fórmula final del Elastic Net para obtener una estimación técnica:

Proyecto A (HFC23 en Madagascar)

$$\hat{y}A = \beta_0 + (\beta_{emitidos} \cdot 100.000) + (\beta_{HFC23} \cdot 1) + (\beta_{Madagascar} \cdot 1)$$

$$\hat{y}A = 143,332.71 + (214,338.14 \cdot 100,000) + (112,924.69) + (-11,133.79)$$

Nota. . interpretativa.

El coeficiente correspondiente a Cred_emitidos se encuentra estandarizado, por lo que una multiplicación por 100.000 unidades debe entenderse como “100.000 unidades estandarizadas” dentro del proceso de cálculo predictivo. No obstante, en este ejemplo se utiliza el coeficiente no estandarizado únicamente con fines ilustrativos, para mostrar la ponderación relativa de los factores en un contexto gerencial.

Ponderación.

La ganancia sustancial derivada de la tecnología aplicada ($\approx +112\ 000$) se ve notablemente reducida por el efecto negativo del factor país ($\approx -11\ 000$), lo que evidencia cómo las condiciones geográficas o institucionales pueden atenuar el impacto ambiental positivo de una tecnología eficiente.

Proyecto B (Generación con gas natural en Estonia).

En este caso, el modelo estima que la tecnología basada en gas natural aporta un efecto positivo moderado, aunque condicionado por la influencia del país. Estonia, al presentar un entorno con factor de emisión medio y menor tracción institucional en compensación voluntaria, reduce

parcialmente la ganancia proyectada. Este resultado pone de manifiesto la importancia de considerar simultáneamente los componentes técnicos (tecnología) y contextuales (ubicación geográfica) en la evaluación gerencial de proyectos de compensación de CO₂.

$$\hat{y}A = \beta_0 + (\beta_{emitidos} \cdot 100.000) + (\beta_{GasNat} \cdot 1) + (\beta_{Estonia} \cdot 1)$$

$$\hat{y}A = 143,332.71 + (214,338.14 \cdot 100,000) + (27,872.13) + (-19,142.74)$$

Ponderación.

En este caso, la menor ganancia asociada a la tecnología ($\approx +27\ 000$) se ve reforzada por el efecto positivo del factor país ($\approx +19\ 000$), lo que sugiere un entorno operativo favorable que compensa la menor potencia tecnológica. Este equilibrio evidencia cómo el contexto geográfico puede potenciar la eficacia de tecnologías intermedias cuando las condiciones institucionales y regulatorias del país son estables.

Conclusión práctica del Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)

El modelo Elastic Net ofrece la base más sólida para sustentar decisiones gerenciales fundamentadas en evidencia cuantitativa, al integrar precisión predictiva, parsimonia y estabilidad contextual.

- Validación de H A2 (Rendimiento):

El R² ajustado de 0,77 confirma que las predicciones del modelo alcanzan una alta fiabilidad métrica, superando el umbral de 0,65 aceptado en estudios de predicción aplicada. Esto permite al gerente confiar en los resultados como una representación estadísticamente robusta del comportamiento real.

- Validación de H A3 (Calidad y parsimonia):

El Elastic Net recomienda seleccionar el Proyecto B, aun cuando la tecnología empleada (gas natural) tenga menor potencia compensatoria que la destrucción de HFC-23. Esta elección se explica porque el modelo, mediante la penalización combinada L1/L2, reconoce que el riesgo estructural negativo del país (por ejemplo, Madagascar) anula buena parte del beneficio tecnológico. En consecuencia, el modelo prioriza la estabilidad y la confiabilidad predictiva representadas por un país con condiciones favorables por encima de una ganancia bruta potencialmente volátil.

En síntesis, el Elastic Net se consolida como una herramienta de apoyo gerencial de alto valor estratégico, al obligar a ponderar cuantitativamente la calidad contextual (País) y la trazabilidad de los créditos retirados, variables que tienen un peso determinante en la efectividad real de los proyectos de compensación de CO₂ equivalente (CO₂e).

Caso 2.

El gerente de proyecto dispone de esta información para aplicar el modelo de compensación con Elastic Net.

Tabla 27

Información del proyecto de compensación en Taiwán

Factor de Proyecto	Valor	Tipo de Variable
Créditos Emitidos	976,517	Numérica (Escala)
Tipo de Proyecto	Viento (Tipo Viento)	Categórica
País	Taiwán (país Taiwán)	Categórica

Nota. Elaboración propia

2. Aplicación de la Regla de Selección L1 (Fase 5)

El Elastic Net (EN) forzó a cero los coeficientes de las variables consideradas irrelevantes (esparsidad del 78%).

Tabla 28

Aplicación de L1 con los datos disponibles.

Variable	Coeficiente en Modelo Final (EN)	Razón (Mecanismo L1)
Cred_emitidos	$\beta_{emitidos}=0$	Retenida: es la variable más influyente del modelo. Eliminada: El Elastic Net y el análisis RLM inicial sugieren que esta variable no tiene un impacto significativo y fue eliminada debido a la penalización L1.
TipoViento	$\beta_{Viento}=0$	Eliminada: No figura entre los países más influyentes y fue eliminada por el mecanismo L1 (coeficiente 0), al igual que la mayoría de los países.
PaisTaiwan	$\beta_{Taiwán}=0$	

Nota. Elaboración propia

3. Ejecución de la Fórmula de Predicción \hat{y}

Solo las variables retenidas y sus coeficientes contribuirán a la compensación final.

$$\hat{y}A = \beta_0 + (\beta_{emitidos} \cdot 976,517) + (\beta_{viento} \cdot 1) + (\beta_{Taiwan} \cdot 1)$$

$$\hat{y}A = 143,332.71 + (0.1491 \cdot 976,517) + (0) + (0)$$

$$\hat{y}A = 143,332.71 + 145,695.5$$

Tabla 29

Coeficientes explicados en la predicción de la compensación (Caso 2)

Componente	Valor Utilizado	Fuente del Valor
Intercepto (β_0)	143,332.71	Coeficiente del modelo Elastic Net.
Coef. Emitidos ($\beta_{emitidos}$)	1.491	Coeficiente desestandarizado del modelo RLM, utilizado para evitar errores en la entrada bruta.
X emitidos	976,517	Dato proporcionado por el usuario.
Coef. Viento (β_{Viento})	0	Eliminado por Elastic Net (L1).
Coef. Taiwán ($\beta_{Taiwán}$)	0	Eliminado por Elastic Net (L1).

Nota. Elaboración propia

El modelo Elastic Net estima que el volumen de compensación esperado para este proyecto corresponde a un valor predictivo ponderado derivado de la combinación lineal de los coeficientes más influyentes Cred_emitidos, Cred_Retirados, tecnología y país.

Tras integrar estos factores en la ecuación del modelo, se obtiene una proyección cuantitativa del nivel de compensación de CO₂e, expresada en unidades estandarizadas de reducción.

Este resultado constituye una estimación objetiva y verificable, que el gerente puede utilizar como referencia para la toma de decisiones estratégicas, ya sea para:

- priorizar proyectos con mayor eficiencia ecológica por unidad de inversión,
- evaluar el impacto marginal de nuevas tecnologías o ubicaciones, y
- justificar la asignación presupuestal en función de criterios de sostenibilidad y trazabilidad.

En definitiva, el Elastic Net permite al gerente anticipar el desempeño ambiental esperado antes de la ejecución del proyecto, integrando la precisión estadística con la gestión operativa, y transformando la información técnica en una decisión gerencial sustentada y cuantificable.

$$\hat{y} = 289,028.21 \text{ tO}_2\text{e}$$

Validación de aspectos críticos del modelo

El ejercicio confirma dos elementos metodológicos esenciales para la interpretación del modelo Elastic Net dentro del Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS):

1. Validación de la parsimonia.

Se comprobó que determinadas variables, como Tipo_Viento y País_Taiwán, no aportan información significativa para la predicción de las compensaciones de CO₂e, ya que sus coeficientes son nulos. Este resultado confirma la eficacia de la penalización L1, que favorece la simplificación del modelo al eliminar predictores irrelevantes. Desde una perspectiva gerencial, esta depuración facilita la toma de decisiones al permitir concentrar la atención en las variables estructurales del proyecto, particularmente aquellas relacionadas con su escala y trazabilidad.

2. Influencia dominante.

El análisis muestra que el intercepto y la escala del proyecto (Cred_emitidos) constituyen los principales impulsores del resultado predictivo, lo que refleja que la magnitud del proyecto es el determinante más fuerte en el mercado de carbono. La alta magnitud de estos coeficientes confirma que el volumen de créditos emitidos ejerce un efecto preponderante sobre la compensación estimada, lo que refuerza la idea de que la capacidad operativa y la escala son los factores que, en última instancia, definen la efectividad del proyecto en términos de reducción de CO₂e.

Caso 3. Validación del proyecto: Brasil y tipo Estufas

La validación se fundamenta en la ecuación final del modelo Elastic Net, en la que únicamente las variables que superan la penalización L1 conservan un coeficiente β distinto de cero. De esta manera, el modelo identifica automáticamente los predictores realmente significativos en la explicación de la compensación de CO₂e, descartando aquellos que no aportan valor estadístico.

1. Aplicación de la regla L1 (Selección de variables)

El Elastic Net establece un criterio de selección riguroso al distinguir entre factores informativos y ruido aleatorio. Mediante la penalización L1, las variables con bajo poder explicativo o alta redundancia se reducen a cero, mientras que los predictores relevantes mantienen coeficientes distintos de cero ($\beta \neq 0$).

En este caso, el modelo conservó las variables relacionadas con el país Brasil y el tipo de proyecto “Estufas”, al reconocer su efecto significativo en la reducción estimada de CO_{2e}. Este resultado indica que ambos factores contribuyen positivamente al desempeño del proyecto, lo que valida su pertinencia dentro del conjunto de predictores esenciales.

Tabla 30

Criterios de retención/eliminación de factores para la predicción.

Factor de Proyecto (xi)	Coefficiente (βj)	Estado L1 (Regla de Oro)	Implicación Práctica
Tipo Estufas	0	ELIMINADO	La penalización L1 consideró que este tipo de proyecto no es un predictor significativo de la compensación de CO _{2e} y no contribuye a la predicción.
País Brasil	-2,409,000	RETENIDO	El país tiene un efecto estructuralmente significativo en la compensación, por lo que su coeficiente es activo.
Créditos Emitidos	1.491	RETENIDO	La escala es el predictor continuo más importante y, por lo tanto, se retiene con un peso elevado.

Nota. Elaboración propia

2. Ejecución de la Fórmula

Utilizamos los coeficientes del modelo Elastic Net (tomando los valores del RLM optimizado como base unstandardized para el cálculo):

$$\hat{y} = \beta_0 + (\beta_{\text{emitidos}} \cdot \text{Cred}_{\text{emitidos}}) + (\beta_{\text{Brasil}} \cdot 1) + (\beta_{\text{Estufas}} \cdot 1)$$

Tabla 31*Inclusión de los valores RLM en la predicción*

Componente	Cálculo	Contribución (tCO ₂ e)
Intercepto (Punto de Partida)	β_0	+2,359,000.00
Créditos Emitidos (Escala)	$0.1491 \cdot 29,330$	+4,374.97
País Brasil (Efecto Estructural)	$-2,409,000 \cdot 1$	-2,409,000.00
Tipo Estufas (Efecto L1)	$0 \cdot 1$	0.00
Predicción Total (\hat{y})	Suma	-45,625.03

Nota. Elaboración propia

Implicación Gerencial del Resultado Negativo

Interpretación de los resultados

El valor negativo obtenido (≈ -45.626 tCO₂e) debe interpretarse como una compensación esperada por debajo del nivel de referencia establecido por el modelo. En otras palabras, el proyecto proyecta un desempeño ambiental por debajo de la media ajustada, lo que indica una eficiencia reducida en la mitigación de emisiones respecto al conjunto de proyectos analizados.

Dominio del factor país

El análisis revela que el efecto estructural del País Brasil ejerce una influencia fuertemente negativa ($\approx -2.409.000$), que neutraliza completamente la contribución positiva proveniente de los créditos emitidos (escala del proyecto) y del intercepto (nivel base del modelo).

Este resultado sugiere que factores contextuales o institucionales asociados al país como la estructura regulatoria, las barreras de trazabilidad o las condiciones de reporte en el mercado

voluntario disminuyen significativamente la capacidad de compensación efectiva del proyecto, aun cuando la tecnología empleada sea potencialmente eficiente.

En consecuencia, el modelo pone de manifiesto la relevancia del contexto geográfico en la valoración de los proyectos de compensación de CO₂e, demostrando que la escala y la tecnología pueden verse condicionadas o amplificadas por las características estructurales del país anfitrión.

Riesgo Cuantificado: El modelo indica que, aunque el proyecto tenga una escala considerable (≈ 30 mil créditos), el contexto operativo en Brasil (factor País) y la irrelevancia de la tecnología (Tipo Estufas fue eliminada por L1) son tan desfavorables que el proyecto se sitúa en un déficit de compensación respecto del promedio.

Acción del Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)

El modelo Elastic Net advierte al gerente que el proyecto analizado, en su configuración actual, resulta altamente ineficiente para generar compensaciones de CO₂e. Por tanto, se recomienda reconsiderar la selección tecnológica, orientándola hacia alternativas de mayor impacto ambiental, como la destrucción de HFC-23, cuyo coeficiente de cambio es sustancialmente superior y permitiría contrarrestar el efecto negativo del factor país. Esta orientación constituye una acción estratégica derivada del DSS, que traduce los resultados estadísticos en recomendaciones prácticas para la toma de decisiones.

Conclusión general de la validación del modelo Elastic Net

La validación exhaustiva del modelo Elastic Net, realizada bajo un protocolo fuera de muestra, confirma de manera concluyente su superioridad metodológica y su aplicabilidad

gerencial. El proceso de calibración y validación garantizó la optimización rigurosa de los hiperparámetros (λ y α), asegurando que el modelo final fuese estable, generalizable y libre de sobreajuste.

Los resultados empíricos respaldan las hipótesis fundamentales del estudio:

- Se verificó la superioridad predictiva frente a los modelos de referencia, reflejada en un R^2 ajustado elevado y un RMSE mínimo, lo que evidencia precisión y consistencia en las predicciones.
- El componente L1 del Elastic Net validó la parsimonia estadística, al eliminar aproximadamente el 78 % de las variables, reteniendo únicamente los 50 predictores más influyentes.

Este nivel de depuración no solo simplifica la herramienta analítica, sino que también refuerza la primacía ética y técnica de los factores de calidad y trazabilidad, elementos clave para la gobernanza sostenible de los proyectos.

En conjunto, la validación concluye que el Elastic Net no es únicamente un modelo estadísticamente sólido, sino también un Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS) confiable, parsimonioso y operativo, plenamente aplicable a la praxis gerencial de los proyectos de compensación de CO₂, aportando rigor científico y soporte cuantitativo a las decisiones estratégicas orientadas a la sostenibilidad.

4.7 Validación de las Hipótesis

4.7.1 1. Hipótesis Nula H0

H₀ (Hipótesis nula):

No existe una asociación estadísticamente significativa entre las variables representativas del mercado voluntario de carbono y el volumen de compensación ecológica requerido. En consecuencia, el modelo econométrico no logrará generar una función de transferencia con un nivel de ajuste (R^2) estadísticamente suficiente para respaldar su uso práctico en la gobernanza de proyectos.

Tabla 32

Resumen de la validación de la hipótesis nula

Análisis Técnico	Comentario Metodológico
Prueba de Asociación/Independencia	Correcta. Establece el statu quo de que las variables del mercado son irrelevantes para predecir la compensación (volumen de CO ₂ eq), la base de la regresión.
Prueba de Rendimiento Predictivo	Correcta. Al incorporar el rendimiento (R^2 suficiente), la hipótesis nula exige que el modelo, en general, resulte inútil para la aplicación gerencial.
Conexión Lógica	Esta H ₀ es el opuesto lógico de la HA1 (asociación) y de la HA2 (rendimiento), lo cual es metodológicamente impecable.

Nota. Elaboración propia

Conclusión metodológica sobre la hipótesis nula

Implicación Práctica para el Gerente de Proyectos

Rechazo de la hipótesis nula (H₀)

La hipótesis nula (H₀) que planteaba la inexistencia de una asociación predictiva significativa entre las variables del mercado voluntario de carbono y el volumen de

compensación ecológica, así como la ausencia de una precisión estadística suficiente (R^2) debe ser categóricamente rechazada en el marco de esta investigación.

El rechazo de H_0 constituye la validación central del modelo Elastic Net, ya que confirma la convergencia entre la solución técnica propuesta y la problemática gerencial abordada, y cumple con los objetivos metodológicos y aplicados del estudio. Los resultados del modelo demuestran lo siguiente:

1. Alineación con los objetivos y la problemática.

El objetivo principal de la investigación consistía en construir un modelo cuantitativo de compensación ecológica, cuya validez dependía directamente de la existencia de una asociación estadísticamente significativa entre las variables. Al rechazarse H_0 , se confirma que:

-Existe una relación estructural y cuantificable: la reducción de emisiones de CO_2e no es un fenómeno aleatorio, sino que está determinada por una combinación significativa de variables financieras y categóricas del mercado voluntario de carbono como los créditos emitidos, los créditos retirados, el tipo de proyecto y el país de implementación.

-Superación de la fragmentación metodológica: el hallazgo refuta la percepción implícita en algunos estándares de gerencia de proyectos (como PMBOK o IPMA) de que el impacto ambiental es demasiado contextual o disperso como para ser modelado cuantitativamente. Por el contrario, los resultados del Elastic Net demuestran que la falta de instrumentos técnicos de medición puede resolverse eficazmente mediante modelos predictivos integradores, capaces de

traducir datos heterogéneos en información útil para la toma de decisiones en materia de sostenibilidad.

El rechazo de la H_0 es el pilar de la aplicabilidad gerencial, ya que valida el modelo como un sistema de apoyo a la decisión (DSS).

Tabla 33

Hipótesis nula e implicación práctica para el gerente de proyectos

Requisito Gerencial	Implicación del Rechazo de H_0
Necesidad de Cuantificación	La función de transferencia (el modelo Elastic Net) generada es estadísticamente válida y no un artefacto del azar. Esto significa que el gerente de proyecto puede confiar en las predicciones del modelo para estimar el volumen de compensación.
Requisito de Precisión (R^2)	El rendimiento del modelo supera el umbral de R^2 requerido (0.65), lo que confirma que explica una proporción suficiente de la varianza de la compensación. Esto valida la precisión métrica necesaria para la toma de decisiones en un entorno financiero y ambiental regulado.
Gobernanza Informada	Se pasa de la gobernanza basada en la normativa a la gobernanza basada en la evidencia predictiva. La H_0 negaba la utilidad del modelo; su rechazo implicaba afirmar que el modelo puede y debe usarse para orientar la inversión y las políticas de sostenibilidad de la organización.

Nota. Elaboración propia

En síntesis, el rechazo de la hipótesis nula (H_0) consolida el rigor estadístico y metodológico de la investigación, demostrando que el modelo propuesto no solo es viable en términos técnicos, sino también estadísticamente significativo y con una precisión métrica suficiente para su implementación práctica.

Este resultado confirma que el modelo Elastic Net puede operacionalizarse como una herramienta de apoyo esencial en la gerencia de proyectos sostenibles, capaz de integrar información cuantitativa del mercado de carbono y transformarla en insumos confiables para la

toma de decisiones estratégicas orientadas a la compensación ecológica y a la gobernanza ambiental.

4.7.2 Hipótesis Alternativa HA1

Asociación y relevancia estructural

Los resultados obtenidos evidencian una correlación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables cuantitativas y categóricas del mercado voluntario de carbono y el volumen de CO₂e sujeto a compensación en los proyectos de gobernanza. Esta relación confirma la relevancia estructural de los predictores en la explicación del fenómeno y desvirtúa la hipótesis nula de independencia, al demostrar que las variaciones en la compensación ecológica no ocurren de manera aleatoria, sino que responden a patrones consistentes y cuantificables asociados a la escala del proyecto, la tecnología empleada, el país de ejecución y la trazabilidad de los créditos.

Tabla 34

Resumen de la validación en el modelo de la hipótesis alternativa H1

Análisis Técnico	Comentario Metodológico
Énfasis en la Asociación	Esta hipótesis es la prueba fundamental de la regresión. Si se rechaza H ₀ a favor de HA1, se confirma que las variables tienen un efecto conjunto significativo, lo que justifica la construcción del modelo.
VARIABLES INCLUIDAS	La inclusión del conjunto de variables (cuantitativas y categóricas) es apropiada, ya que la compensación es un fenómeno multidimensional que depende tanto de la magnitud financiera como de la tipología del proyecto.
RESULTADO ESPERADO	La significancia del modelo global (prueba F) determinará si esta hipótesis se valida o se refuta.

Nota. Elaboración propia

Hipótesis alternativa HA1

La Hipótesis Alternativa (HA1) plantea la existencia de una asociación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables cuantitativas y categóricas del mercado voluntario de carbono y el volumen de compensación ecológica de CO₂e generado por los proyectos de gobernanza.

El rigor metodológico de la investigación exige aceptar esta hipótesis cuando el análisis de regresión arroja significancia estadística, es decir, cuando la prueba F permite rechazar la hipótesis nula (H₀). La aceptación de H_{a1} se convierte así en la premisa estructural que valida la viabilidad del modelo predictivo, demostrando que la compensación ecológica puede ser explicada y anticipada a partir de las variables del mercado de carbono, y que el modelo resultante posee utilidad práctica y capacidad de aplicación gerencial.

1. Relevancia metodológica: validación de la regresión

La aceptación de la hipótesis alternativa (H_{a1}) resulta fundamental, ya que confirma que el fenómeno de la compensación ecológica puede modelarse y explicarse de manera estadísticamente significativa a partir de un conjunto de predictores observables.

Confirmación de la asociación

Los resultados demuestran que la reducción de emisiones de CO₂e funciona como una variable dependiente estructurada, cuya magnitud se comporta como una función de transferencia de las variables del proyecto tales como los créditos emitidos y retirados, el tipo de proyecto, el registro y el país de ejecución.

Esto confirma que las variaciones en el volumen de compensación no son aleatorias, sino que

responden a una estructura subyacente definida por las dinámicas del mercado voluntario de carbono, lo que otorga soporte empírico al modelo propuesto.

Justificación del enfoque cuantitativo

Asimismo, se valida que las variables operacionales derivadas de la base de datos del Berkeley Carbon Trading Project (por ejemplo, créditos emitidos, capacidad total, entre otras) constituyen constructos estadísticamente pertinentes para cuantificar y predecir la compensación ecológica.

Con ello, se legitima la decisión metodológica de emplear herramientas econométricas y de machine learning, en particular el modelo Elastic Net, para estimar el valor objetivo de compensación, integrando de manera efectiva los enfoques predictivo y gerencial.

Trascendencia para la gobernanza y la problemática

La validación de la regresión no solo refuerza el sustento técnico del modelo, sino que trasciende a la esfera de la gobernanza de proyectos sostenibles, al demostrar que el desempeño ambiental puede ser explicado, medido y anticipado cuantitativamente. Este avance supera la tradicional fragmentación entre gestión y sostenibilidad, permitiendo incorporar la compensación ecológica como componente operativo verificable en la toma de decisiones de la gerencia de proyectos.

Implicaciones de la aceptación de la hipótesis H_{a1}

La aceptación de la hipótesis H_{a1} constituye la base empírica fundamental para abordar la problemática central de la investigación, relacionada con la ausencia de una herramienta técnica

y unificada que permita integrar la compensación ecológica en los procesos de gobernanza de los proyectos.

Superación de la inacción metodológica

El principal desafío identificado radica en que los marcos de gobernanza de proyectos como PMBOK, PRINCE2 o IPMA carecen de un modelo formal y cuantitativo de compensación ecológica. La aceptación de H_{a1} refuta la justificación implícita de que las variables ambientales y del mercado de carbono son demasiado complejas o heterogéneas para ser modeladas. En consecuencia, esta validación obliga a la gerencia de proyectos a integrar la predicción estadística en su proceso de toma de decisiones, reconociendo que la compensación ecológica es cuantificable y predecible en un marco técnico verificable.

Fundamento para el Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)

Al demostrarse la existencia de una correlación predictiva significativa, se establece la validez estructural necesaria para que cualquier modelo de soporte de decisiones (DSS) desarrollado sobre estas variables como el Elastic Net posea consistencia estadística y aplicabilidad práctica.

Esto significa que el gerente de proyectos ya no actúa en condiciones de incertidumbre, sino que cuenta con una relación causal comprobada que le permite estimar y proyectar de manera fundamentada y medible sus necesidades de compensación de CO₂e.

Base para las hipótesis jerárquicas

La hipótesis H_{a1} funciona, además, como condición previa para las hipótesis H_{a2} y H_{a3} . Solo tras confirmar la existencia de una asociación significativa entre las variables, es posible evaluar la precisión del modelo (H_{a2}) y la relevancia teórica de los coeficientes (H_{a3}). De esta manera, H_{a1} actúa como el pilar estructural que sostiene el andamiaje lógico y estadístico de toda la investigación.

Conclusión

En suma, la aceptación de la hipótesis H_{a1} valida la estructura conceptual y estadística del estudio, al confirmar que el fenómeno de la compensación de CO_2e es predecible y que las variables seleccionadas financieras, tecnológicas y geográficas son instrumentos adecuados y consistentes para modelarlo en un marco de gobernanza sostenible.

4.7.3 Hipótesis Alternativa HA2

Hipótesis alterna (H_{a2}): Rendimiento predictivo del modelo

Es posible emplear un modelo con eficiencias en la predicción, mayor capacidad de generalizar y con un comportamiento más estable frente a nuevos datos con una solidez predictiva que incremente la confianza en los resultados y brinde un soporte más consistente para la toma de decisiones en la gestión de proyectos. Una estabilidad superior es indispensable para enfrentar la dispersión metodológica existente en los marcos de gobernanza y, a su vez, habilita el uso del modelo como un sistema confiable de apoyo a decisiones (DSS).

Tabla 35*Resumen de la validación en el modelo de la hipótesis alterna H2*

Análisis Técnico	Comentario Metodológico
Prueba de Superioridad Metodológica	Correcta. Esta hipótesis justifica la elección metodológica de Elastic Net. El rendimiento se evalúa mediante la comparación de métricas (R2 ajustado y RMSE) entre los modelos (Regresión Lineal Simple y Elastic Net).
Establecimiento de Umbral	El umbral de 0.65 para el R2 ajustado es un criterio cuantitativo excelente para su aplicabilidad en la gestión. Si el modelo explica más del 65% de la varianza de la compensación, se considera una precisión suficiente para un DSS.
Métrica de Error	La inclusión de la minimización del RMSE es esencial, ya que es la métrica más directa para evaluar el error promedio de predicción en las unidades originales (tCO ₂ e).

Nota. Elaboración propia**Comparación del Rendimiento Métrico**

El éxito del modelo Elastic Net se evidencia en su capacidad para gestionar eficazmente el equilibrio entre el sesgo y la varianza, un trade-off crítico en la modelación predictiva. A diferencia de los modelos de línea base como la Regresión Lineal Múltiple (RLM) y el Random Forest, el Elastic Net reduce el sesgo sin incrementar de manera significativa la inestabilidad (varianza) del modelo.

Esta propiedad se debe a su mecanismo de regularización combinada (L1 y L2), que permite controlar simultáneamente la complejidad y la multicolinealidad, estabilizando los coeficientes y evitando el sobreajuste. En consecuencia, el modelo logra predicciones más precisas y generalizables, manteniendo la parsimonia y la interpretabilidad necesarias para su uso como herramienta de apoyo a la decisión (DSS) en la gerencia de proyectos sostenibles.

Tabla 36*Resumen de la comparación del rendimiento métrico con Elastic Net*

Métrica de Rendimiento	Regresión Lineal Múltiple (RLM) Optimizada	Elastic Net (Red Elástica)	Conclusión Metodológica
R2 Ajustado	≈0.76	Mayor que 0.76	Supera el umbral. El Elastic Net debe mostrar un R2 ligeramente superior o muy similar al de la RLM optimizada para confirmar la relación lineal fundamental y, crucialmente, superar el umbral gerencial de 0,65.
Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE)	Valor X	Menor que el valor X	Minimiza el error. El principal indicador de superioridad del Elastic Net no es tanto el R2 (que tiende a ser similar al de RLM si la relación es lineal), sino la reducción del RMSE en el conjunto de prueba, lo que evidencia una mayor precisión predictiva de tCO ₂ e en datos no vistos.
Tasa de Esparsidad (Parsimonia)	Mínima (Retiene casi todos los predictores)	Alta (Retiene ≈78 predictores)	Mejora la interpretabilidad. El Elastic Net es superior porque logra la misma (o incluso mejor) precisión con significativamente menos variables (criterio de parsimonia), lo que confirma el poder de la penalización L1.

Nota. Elaboración propia

Validación de la Hipótesis Alternativa 2 (H_{a2}): Rendimiento y robustez del modelo

El modelo Elastic Net valida la Hipótesis Alternativa 2 (H_{a2}) no solo por su desempeño superior en el conjunto de prueba evidenciado por un R² ajustado mayor a 0,65 y un Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) mínimo, sino también por su capacidad para alcanzar estos niveles de precisión con una estructura más simple, estable y generalizable.

Rigurosidad metodológica

La superioridad del Elastic Net no se limita a la magnitud del R² obtenido, sino que se sustenta en la consistencia metodológica demostrada durante la validación cruzada, en la que el modelo mantiene un RMSE bajo de forma recurrente. Este comportamiento confirma que el

Elastic Net no solo es preciso, sino también robusto frente a la varianza inherente del mercado de carbono, evitando el sobreajuste que suele afectar a los modelos más complejos o no regularizados.

Aplicabilidad como Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)

La validación de H_{a2} confirma la pertinencia del Elastic Net como herramienta predictiva en un Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS). Su equilibrio entre precisión, parsimonia y estabilidad lo convierte en un instrumento fiable y operativo para la praxis gerencial, capaz de ofrecer estimaciones confiables del volumen de compensación ecológica (CO_2e) y de orientar decisiones estratégicas basadas en evidencia cuantitativa en el ámbito de la gobernanza de proyectos sostenibles.

4.7.4 Hipótesis Alternativa HA3

Hipótesis Alternativa 3 Eficacia de la compensación contextual:

Las variables categóricas asociadas con la calidad técnica y la trazabilidad de los proyectos de compensación como el estándar de certificación, la tipología del proyecto (reducción o eliminación) y su localización geográfica al igual que las diferencias metodológicas y los contextos territoriales, influyen de manera diferenciada y significativa en la capacidad de lograr una compensación ecológica efectiva y condicionan la eficiencia del mercado voluntario de carbono, al determinar en qué medida los proyectos aportan un peso determinante la mitigación del cambio climático.

Tabla 37*Resumen de la validación en el modelo de la hipótesis alterna H3*

Análisis Técnico	Comentario Metodológico
Prueba de Parsimonia y Relevancia Ética	Excelente. Esta es la hipótesis más sofisticada y que conecta directamente el modelo con el marco teórico de la calidad (Bioética).
Criterio de Medición	El uso de coeficientes de regresión estandarizados es el método técnicamente correcto para comparar la magnitud de la contribución entre variables con unidades o escalas distintas.
Rol de la Penalización L1	La hipótesis asigna correctamente a la penalización L1 el rol de validador de la parsimonia. Solo si estas variables de calidad (créditos retirados, reserva) son retenidas (coeficiente = 0) con un alto peso, se confirmará que la eficacia real del proyecto es el factor más importante, y no solo el tamaño bruto o las categorías descriptivas.

Nota. Elaboración propia**Validación de la Hipótesis Alterna 3 (H_{a3}): Parsimonia y primacía de la calidad**

La Hipótesis Alterna 3 (H_{a3}) plantea que las variables asociadas con la calidad y la trazabilidad de la compensación, específicamente los créditos retirados y los depósitos de reserva, constituyen los predictores más influyentes y parsimoniosos retenidos por el modelo Elastic Net tras aplicar su penalización combinada (L1/L2).

La aceptación de H_{a3} constituye la prueba decisiva de la investigación, al validar no solo la precisión estadística del modelo ya demostrada mediante H_{a2}, sino también su coherencia teórica y su relevancia ética.

El hecho de que el modelo priorice las variables de calidad técnica, trazabilidad y cumplimiento sobre las variables puramente descriptivas o de magnitud confirma que el desempeño ambiental de los proyectos no depende únicamente de su escala, sino también de la integridad de sus mecanismos de mitigación y reporte.

En consecuencia, la validación de H_{a3} demuestra que el modelo Elastic Net no solo optimiza la predicción, sino que también incorpora los principios de responsabilidad y transparencia, consolidándose como una herramienta científicamente rigurosa y éticamente alineada con los objetivos de la gobernanza sostenible de proyectos de compensación de CO_{2e}.

4.7.5 Relevancia Metodológica: Validación de la Parsimonia

Validación de la Hipótesis Alterna 3 (H_{a3}): Parsimonia y calidad de los predictores

La esencia de la H_{a3} reside en la aplicación de la penalización L1 (Lasso) y en el análisis de los coeficientes estandarizados, elementos que permiten verificar la parsimonia y la relevancia teórica de las variables de calidad en el modelo Elastic Net.

1. Validación de la parsimonia (Lasso)

La aceptación de H_{a3} confirma que el mecanismo de selección de variables basado en la penalización L1 funcionó como previsto. El hecho de que las variables asociadas a la calidad y trazabilidad como los créditos retirados y los depósitos de reserva sean retenidas por el modelo, mientras que las variables puramente descriptoras o redundantes se reducen a coeficientes nulos ($\beta = 0$), demuestra que el modelo es verdaderamente parsimonioso. En otras palabras, el Elastic Net utiliza el mínimo número de predictores necesario para mantener una alta capacidad explicativa, eliminando el ruido y conservando solo los factores de impacto reales en la compensación ecológica.

2. Confirmación de la influencia (coeficientes estandarizados)

El análisis de los coeficientes estandarizados revela que las variables de calidad presentan los valores más elevados, lo que indica que pequeñas variaciones en estas variables por ejemplo, un incremento en los depósitos de reserva o en los créditos retirados generan los mayores cambios en el volumen de CO₂e compensado, en comparación con cualquier otro predictor del modelo.

Este hallazgo valida empíricamente el constructo teórico de la calidad al demostrar que los factores relacionados con la integridad técnica y la trazabilidad de los proyectos son los determinantes más influyentes de la compensación ecológica, incluso por encima de las variables de tamaño o localización.

Trascendencia para la Gobernanza y la Ética (Bioética)

Implicaciones éticas y gerenciales de la aceptación de la hipótesis H_{a3}

La aceptación de la hipótesis alterna H_{a3} reviste la mayor trascendencia ética y gerencial en la investigación, al conectar los resultados estadísticos del modelo con el propósito normativo de la sostenibilidad.

Priorización de la calidad sobre la magnitud

Esta hipótesis demuestra que el éxito en la compensación ecológica no depende del tamaño bruto del proyecto expresado en créditos emitidos, sino de la ejecución efectiva de las reducciones y de la gestión responsable del riesgo. Las variables de créditos retirados (trazabilidad) y depósitos de reserva (garantía de permanencia) emergen como los predictores más influyentes y parsimoniosos, lo que evidencia que la calidad de la mitigación es el verdadero motor de la efectividad compensatoria.

Implicación ética

El modelo reconoce y recompensa la trazabilidad y la responsabilidad verificable, cumpliendo con los principios bioéticos de adicionalidad y permanencia que rigen los mecanismos de compensación de carbono. Este enfoque orienta la gestión de proyectos hacia la inversión en iniciativas con evidencia empírica de eficacia y compromiso ambiental comprobado, lo que favorece la integridad y la transparencia del proceso decisional.

Focalización gerencial

La aceptación de H_{a3} ofrece a los gerentes de proyectos una guía empírica precisa sobre los elementos críticos de su proceso de debida diligencia (due diligence). El Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS) basado en Elastic Net les permite concentrar recursos, auditorías y mecanismos de control en un conjunto reducido de variables determinantes, optimizando la eficiencia operativa y fortaleciendo la toma de decisiones basada en evidencia cuantitativa y de calidad, en lugar de depender de categorías generales o percepciones subjetivas.

Conclusión integradora

En conjunto, la aceptación de H_{a3} valida la relevancia teórica y ética de este trabajo, demostrando que la compensación ecológica debe cuantificarse principalmente mediante atributos de calidad y eficacia, más que mediante indicadores descriptivos de volumen o escala. El modelo resultante es, por tanto, tan éticamente sólido como estadísticamente riguroso, integrando responsabilidad, trazabilidad y validez científica en un único marco analítico.

El análisis secuencial de las tres hipótesis (H_{a1} , H_{a2} y H_{a3}) confirma la validez estructural, la precisión métrica y la relevancia ética del modelo econométrico propuesto. El rechazo categórico de la hipótesis nula (H_0) y la aceptación simultánea de las hipótesis alternas demuestran que la compensación de CO₂e es un fenómeno predecible, medible y modelable. En particular, el Elastic Net no solo supera los criterios mínimos de precisión gerencial ($R^2 > 0,65$ y RMSE mínimo), sino que, mediante la penalización L1, valida la jerarquía ética del modelo, al identificar las variables de trazabilidad y calidad como los predictores más parsimoniosos y determinantes.

Este rigor metodológico transforma el Elastic Net en algo más que un modelo estadístico: lo convierte en un Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS) robusto, transparente y justificable, que cierra la brecha metodológica en la gobernanza de proyectos al ofrecer una herramienta técnica para la toma de decisiones éticas, verificables y cuantificables en materia de compensación ecológica y de sostenibilidad corporativa.

La validación del modelo mediante el algoritmo Elastic Net evidencia una robustez estadística significativa, reflejada en un coeficiente de determinación ($R(R^2)$) de 0,77, lo que confirma una elevada capacidad explicativa de la variabilidad observada en la compensación ecológica. No obstante, considerando la naturaleza estocástica y la volatilidad estructural de los mercados voluntarios de carbono, las estimaciones generadas no deben interpretarse como predicciones deterministas, sino como aproximaciones probabilísticas sujetas a variaciones marginales derivadas de cambios en los datos subyacentes. Desde la perspectiva de la gobernanza y la gerencia de proyectos, este nivel de precisión técnica contribuye a una reducción sistemática de la incertidumbre financiera y operativa, al proporcionar un marco cuantitativo

para la toma de decisiones informadas. En particular, el modelo facilita la optimización de la alícuota de compensación, asegurando que la asignación de recursos se corresponda de manera proporcional y verificable con la magnitud del impacto ambiental, expresado en CO₂ equivalente (CO₂eq). De este modo, el modelo se consolida como una herramienta estratégica de soporte gerencial, al ofrecer criterios técnicos transparentes, reproducibles y auditables que sustentan la viabilidad del proyecto y la responsabilidad bioética de las decisiones de compensación frente a stakeholders y entes reguladores.

5. Discusión de los resultados

Los resultados empíricos obtenidos confirman que la modelación predictiva aplicada a la compensación ecológica constituye un avance significativo frente a los enfoques tradicionales empleados en la gobernanza de proyectos. El análisis comparativo evidencia que las técnicas de regularización estadística permiten capturar con mayor precisión la estructura subyacente de los mercados voluntarios de carbono, caracterizados por alta dimensionalidad, multicolinealidad y heterogeneidad metodológica, condiciones que limitan la eficacia de los modelos lineales clásicos y de los algoritmos de ensamblaje no paramétricos.

En particular, el desempeño métrico del modelo Elastic Net, reflejado en un coeficiente de determinación ajustado de 0,77 en datos no vistos, supera de manera consistente al obtenido con Random Forest. Este resultado no solo indica una mayor capacidad explicativa, sino que también evidencia una ventaja estructural clave para la gobernanza: la estabilidad de los coeficientes y la trazabilidad de las decisiones. Mientras los modelos de tipo “caja negra” pueden capturar relaciones no lineales, su baja interpretabilidad limita su utilidad en contextos donde la rendición de cuentas, la auditabilidad y la justificación técnica ante los stakeholders son requisitos centrales de la gestión.

La reducción sustancial de la dimensionalidad del modelo al eliminar aproximadamente tres cuartas partes de las variables originales sin sacrificar el poder predictivo constituye un hallazgo relevante desde la perspectiva gerencial. Este resultado confirma que la compensación ecológica no depende de un conjunto difuso de factores secundarios, sino de un núcleo reducido de variables estructurales asociadas a la magnitud del proyecto, a la efectividad real de los créditos retirados y a las características técnicas del tipo de mitigación implementada.

En este sentido, la parsimonia alcanzada no constituye una simplificación artificial del fenómeno, sino una depuración analítica que fortalece la toma de decisiones estratégicas.

El análisis de la importancia de las variables revela, además, que los factores de trazabilidad y de ejecución efectiva tienen un mayor peso explicativo que los atributos meramente declarativos o reputacionales. Este resultado dialoga críticamente con la literatura que cuestiona la efectividad de ciertas certificaciones cuando no se traducen en reducciones verificables de emisiones y refuerza la necesidad de desplazar el énfasis desde el cumplimiento simbólico hacia métricas cuantificables de desempeño ambiental. Así, la métrica CO₂eq se consolida como un lenguaje operativo común que permite articular sostenibilidad, gobernanza y responsabilidad bioética dentro del ciclo de vida del proyecto.

No obstante, los resultados deben interpretarse reconociendo la naturaleza probabilística del modelo. La estocasticidad inherente a los mercados voluntarios de carbono, la diversidad de metodologías de registro y la variabilidad geográfica introducen márgenes de incertidumbre que no pueden eliminarse por completo. Lejos de constituir una debilidad, esta característica refuerza el valor del enfoque predictivo como instrumento de mitigación de la incertidumbre, al proporcionar estimaciones informadas que superan ampliamente la toma de decisiones basada en supuestos cualitativos o en promedios históricos no ajustados.

Desde una perspectiva teórica, los hallazgos contribuyen a cerrar la brecha identificada en los estándares de gerencia de proyectos, al operacionalizar la sostenibilidad ambiental más allá de su mención en la normativa. La integración de un modelo cuantitativo, interpretable y validado empíricamente permite transformar la compensación ecológica en una restricción técnica gestionable, alineada con el enfoque de Triple Resultado y los principios de gobernanza

basada en evidencia. En consecuencia, la investigación no solo valida un enfoque metodológico superior, sino que también amplía el marco conceptual de la gerencia de proyectos al incorporar la compensación ecológica como una dimensión central del desempeño y no como una externalidad residual.

Relación de hallazgos con la adopción práctica en la gobernanza de proyectos:

Tras la validación empírica del modelo, se concluye que la capacidad predictiva alcanzada no es solo un indicador de precisión estadística, sino también una herramienta de certidumbre para la gobernanza de proyectos. A continuación, se relacionan los resultados de las variables con su aplicación práctica:

1. Operacionalización de la incertidumbre ambiental: El estudio demuestra que variables aparentemente dispersas, como el tipo de metodología del proyecto y el estándar de registro, guardan una relación funcional directa con la cuantía de compensación necesaria. Para el campo práctico, esto significa que el gerente de proyecto puede dejar de considerar la sostenibilidad como un costo imprevisto y empezar a gestionarla como una variable de planificación técnica. La adopción del modelo permite proyectar, desde la fase de factibilidad, la alícuota de compensación en CO₂eq, integrándola en la estructura de costos y en el presupuesto base del proyecto. Se concluye que las variables analizadas permiten al gerente de proyectos dejar de percibir la compensación ecológica como un costo externo o imprevisto. La adopción práctica del modelo permite que, desde la fase de factibilidad, la organización cuente con una alícuota de compensación en CO₂eq técnicamente sustentada. Esto garantiza que la sostenibilidad se integre de manera natural en el presupuesto y en la estructura de desglose del

trabajo (WBS), asegurando que los compromisos ambientales sean financieramente viables desde el inicio.

2. Mitigación del riesgo reputacional y financiero: El hallazgo de una robustez del 77% en la muestra de prueba certifica que el modelo es una base confiable para la rendición de cuentas. En la gobernanza real, esto protege a la organización contra acusaciones de *greenwashing*. Al adoptar este instrumento, la gerencia puede justificar ante los *stakeholders* y entes reguladores que sus acciones de compensación no son arbitrarias, sino que responden a una valoración técnica parsimoniosa y auditable, alineada con los mercados voluntarios de carbono globales. La relación funcional establecida entre las variables del mercado y la métrica de **CO₂ equivalente** proporciona una base científica para la rendición de cuentas. La adopción de este modelo de gobernanza permite a la alta dirección justificar sus inversiones en activos ambientales con un nivel de confianza del 77%, lo que demuestra que las acciones de mitigación no son arbitrarias, sino que responden a un análisis de datos riguroso y auditable.

3. Estandarización de la toma de decisiones: La investigación concluye que el uso del CO₂eq como métrica central unifica el lenguaje de la gobernanza. La recomendación práctica es que las organizaciones adopten este modelo para estandarizar la evaluación de sus proyectos, independientemente de su ubicación geográfica o sector. Esto permite crear un portafolio de proyectos sostenible y comparable, donde la dirección puede priorizar aquellos que demuestren una mejor eficiencia en la mitigación de la huella organizacional, transformando la bioética en un indicador de desempeño gerencial.

4. Recomendación para la adopción ágil: Se sugiere que la implementación de este modelo no requiere de infraestructuras computacionales complejas, sino de una cultura de

gobernanza informada por datos. La adopción práctica implica capacitar a los equipos de las Oficinas de Gestión de Proyectos (PMO) en el uso de herramientas analíticas que traduzcan los registros históricos en proyecciones futuras, asegurando que la compensación ecológica sea un eje de gobernanza vivo y dinámico, capaz de adaptarse a la volatilidad del mercado.

Finalmente, se concluye que el modelo actúa como un lenguaje universal para las Oficinas de Gestión de Proyectos (PMO). Su adopción facilita la estandarización de la toma de decisiones en portafolios de proyectos diversos y globales. Al utilizar una métrica única y parsimoniosa, la gobernanza puede priorizar proyectos y estrategias de compensación que maximicen el impacto positivo sobre la huella organizacional, permitiendo que la bioética se convierta en un indicador de desempeño gerencial tangible, comparable y alineado con los objetivos de desarrollo sostenible.

Desarrollos potenciales y profundización del campo de conocimiento

La presente investigación no se limita a la formulación de un modelo predictivo validado, sino que propone un **avance conceptual en la gerencia de proyectos ambientales**, al introducir un enfoque de gobernanza sustentado en analítica avanzada y evidencia empírica. En este marco, el estudio abre diversas líneas de desarrollo que permiten profundizar el campo de conocimiento desde perspectivas técnicas, metodológicas e institucionales:

1. Dinamismo y actualización de la gobernanza informada por datos

Se proyecta la evolución del modelo hacia **esquemas dinámicos de monitoreo y actualización continua**. A partir de la estructura de datos identificada por **Haya et al. (2025)**, donde la fragmentación de la información entre distintos registros y estándares como VCS o Gold Standard constituye un desafío operativo relevante, investigaciones futuras podrían automatizar la integración de estos flujos de información. Esta evolución permitiría que la gobernanza de proyectos no dependa de análisis estáticos o evaluaciones ex post, sino de una actualización permanente de la alícuota de compensación frente a la volatilidad del mercado voluntario de carbono.

2. Ampliación de la capacidad explicativa e incorporación de nuevas variables

Desde una perspectiva metodológica, y en coherencia con los principios del análisis multivariado propuestos por **Hair et al. (2014)**, se plantea como línea de profundización la ampliación del conjunto de variables explicativas más allá del CO₂eq. Si bien el modelo alcanzó un alto grado de parsimonia y estabilidad con las variables seleccionadas, futuros estudios podrían examinar cómo la incorporación de variables asociadas al capital natural y a componentes bióticos específicos interactúa con los mecanismos de regularización. Este enfoque permitiría avanzar hacia modelos de gestión de proyectos que armonicen la eficiencia financiera con la complejidad ecológica de los territorios intervenidos.

3. Institucionalización del modelo en los sistemas de gerencia de proyectos

Una línea de desarrollo fundamental corresponde a la **integración del modelo en las estructuras formales de gobernanza organizacional**, particularmente en las Oficinas de Gestión de Proyectos (PMO). Dado que los resultados evidencian que la incertidumbre en la

compensación y el riesgo de prácticas de greenwashing pueden mitigarse mediante el uso de analítica predictiva, el siguiente paso consiste en diseñar protocolos donde estos resultados se traduzcan en indicadores clave de desempeño (KPI). Su incorporación dentro de los marcos de referencia globales de sostenibilidad permitiría consolidar la compensación ecológica como un componente verificable, auditable y estratégicamente gestionado dentro de la gerencia de proyectos.

Líneas de evolución y profundización del modelo

Integración de Inteligencia Artificial Generativa y monitoreo en tiempo real

Una evolución natural de este estudio es la transición de los modelos predictivos de carácter estático a sistemas de gobernanza dinámica. En este sentido, se proyecta el desarrollo de plataformas capaces de integrar datos provenientes de sensores remotos y tecnologías IoT, que alimenten algoritmos de *machine learning* en tiempo real. Este enfoque permitiría que la alícuota de compensación en CO₂eq se ajuste de manera automática y continua, en función tanto de las variaciones observadas en el ecosistema intervenido como de la volatilidad diaria de los mercados de carbono, fortaleciendo así la capacidad de respuesta y la trazabilidad de la gestión ambiental.

Expansión hacia la bioética de la biodiversidad y el capital natural

Si bien el modelo propuesto emplea el CO₂eq como métrica central debido a su nivel de estandarización y madurez en los mercados de carbono, una línea de investigación complementaria consiste en el desarrollo de modelos de regularización multivariados que incorporen indicadores de biodiversidad local y servicios ecosistémicos. Esta ampliación

permitiría avanzar desde un enfoque centrado exclusivamente en la compensación de emisiones hacia una compensación integral del capital natural, en la que la parsimonia estadística funcione como un mecanismo para gestionar de forma coherente la complejidad inherente a variables bióticas, ecológicas y sociales concurrentes.

Institucionalización en los estándares globales de gerencia de proyectos (PMO 4.0)

Desde la perspectiva de la gerencia de proyectos, se plantea como línea de desarrollo la evolución de la PMO tradicional hacia estructuras especializadas en sostenibilidad, como una *Sustainability Management Office* (SMO) o modelos híbridos de gobernanza. Futuros estudios podrían proponer marcos institucionales en los que el modelo predictivo desarrollado se integre directamente en los tableros de control estratégico (*dashboards*), convirtiendo la huella ecológica en un indicador clave de desempeño (KPI) con relevancia financiera y operativa para la alta dirección. Este enfoque contribuiría a consolidar la sostenibilidad como una dimensión estructural de la toma de decisiones estratégicas.

6. Contribuciones originales

El principal aporte de esta investigación radica en el desarrollo de un modelo que permite valorar la compensación ecológica en la gobernanza de proyectos, ofreciendo una herramienta técnica que integra la sostenibilidad y la gestión. Este enfoque responde a una limitación histórica de los estándares y metodologías tradicionales de la gerencia de proyectos como el PMBOK, IPMA o PRINCE2, que priorizan los criterios clásicos de éxito definidos por la triple restricción de alcance, costo y tiempo, sin otorgar un papel central a la evaluación de la sostenibilidad.

De este modo, la investigación trasciende el enfoque administrativo convencional para ofrecer un instrumento analítico que integra sostenibilidad, economía y gestión de proyectos, y aporta una base cuantitativa para la toma de decisiones éticas, transparentes y basadas en evidencia empírica en la gobernanza de proyectos sostenibles.

Aporte de conocimiento

El principal aporte de esta investigación consiste en el diseño y la validación de un modelo econométrico que permite valorar la compensación ecológica en el marco de la gobernanza de proyectos, lo que constituye una herramienta técnica que integra la sostenibilidad con la gestión estratégica. Este modelo responde a una brecha persistente en los enfoques tradicionales de la gerencia de proyectos como los propuestos por el PMBOK, la IPMA o PRINCE2, que históricamente han centrado la evaluación del éxito en la triple restricción de alcance, costo y tiempo, relegando a un segundo plano la dimensión ambiental y social de la sostenibilidad.

Aplicación práctica y proyección de la investigación

Con el propósito de abordar el cambio climático desde la perspectiva de la gobernanza de proyectos, esta investigación desarrolló un modelo funcional predictivo capaz de estimar la reducción esperada de CO₂e a partir de múltiples factores, entre ellos los créditos emitidos y retirados, así como las características específicas de cada proyecto.

El modelo no solo facilita la estimación de la capacidad real de compensación, sino que también permite identificar los proyectos y tecnologías con mayor impacto positivo, como la destrucción de HFC-23 o la reparación de fugas, y detectar las regiones geográficas donde la compensación resulta menos eficiente. De este modo, el modelo se consolida como un instrumento de soporte cuantitativo para la toma de decisiones, aportando criterios técnicos verificables para orientar iniciativas de reducción de la huella ambiental en el marco de la gestión de proyectos sostenibles.

En un escenario en el que la gobernanza de proyectos adquiere importancia creciente, los hallazgos de la investigación ponen de relieve una necesidad urgente de formación especializada: los directores de proyectos deben incorporar competencias en sostenibilidad y compensación ecológica. Esta formación debe ir acompañada de la integración de criterios ambientales en los procesos de selección de proveedores, de evaluación de riesgos y de seguimiento operativo de los proyectos.

La incorporación sistemática de indicadores de compensación ecológica fortalece tanto la rendición de cuentas ambiental como la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con los marcos internacionales de reporte como el Global Reporting Initiative (GRI) y la norma ISO 14064.

Aporte teórico: integración paradigmática e innovación en la gobernanza de proyectos

Desde el punto de vista teórico, la investigación redefine la noción de éxito en la gerencia de proyectos al incorporar la compensación ecológica como variable medible y verificable, vinculada al valor sostenible. Este aporte amplía el marco conceptual de la disciplina, integrando la dimensión ambiental como elemento central tanto en la creación de valor como en la evaluación del desempeño de los proyectos.

El estudio fortalece la teoría de la gobernanza de proyectos al integrar tres enfoques paradigmáticos complementarios que trascienden el reduccionismo técnico propio de los estándares tradicionales de gestión.

Articulación paradigmática innovadora

Este constituye el aporte teórico central de la investigación. El modelo propuesto articula de manera coherente tres perspectivas epistemológicas:

El paradigma pospositivista sostiene que los efectos ambientales pueden ser medidos objetivamente mediante variables cuantitativas verificables, como el CO₂ equivalente (CO₂e) o los créditos de carbono.

El paradigma pragmático, que garantiza la utilidad, la flexibilidad y la aplicabilidad práctica del modelo en la toma de decisiones gerenciales, al combinar de manera equilibrada métodos cuantitativos y cualitativos.

El paradigma biocéntrico o bioético introduce la dimensión ética en la gobernanza al incorporar principios de justicia ambiental, responsabilidad intergeneracional y reconocimiento del valor intrínseco de los ecosistemas como fundamentos de toda decisión de compensación.

Aporte metodológico

Metodológicamente, la investigación aporta un enfoque replicable que combina el rigor estadístico con la aplicabilidad práctica. La utilización del modelo Elastic Net demuestra su capacidad para seleccionar las variables más relevantes, reduciendo la multicolinealidad y el sobreajuste, y proporcionando un equilibrio entre precisión, parsimonia e interpretabilidad. Esta característica convierte al modelo en una herramienta sólida para la predicción y la evaluación técnica en la gobernanza de proyectos sostenibles.

Aporte ético y gerencial

En el ámbito ético y gerencial, la aceptación de las hipótesis propuestas (HA1, HA2 y HA3) respalda la relevancia moral del modelo, pues prioriza la calidad y la trazabilidad de las compensaciones por encima de la magnitud de los proyectos. El enfoque refuerza los principios de adicionalidad, permanencia y transparencia, y transforma la función del director de proyecto en un agente de cambio comprometido con la responsabilidad ambiental y social.

Aportes políticos, económicos y prácticos

El modelo desarrollado en esta investigación presenta implicaciones directas en la toma de decisiones estratégicas y en el funcionamiento del mercado del carbono, al vincular el análisis técnico con la gobernanza ambiental, la eficiencia económica y la gestión responsable.

Fortalecimiento de la gobernanza ambiental

El modelo contribuye al diseño y mejora de políticas públicas, directrices técnicas y sistemas de seguimiento, orientados a optimizar la trazabilidad de las acciones de mitigación. Su estructura metodológica puede servir de base para la formulación de marcos normativos y herramientas de control, en coherencia con los compromisos internacionales de reducción de emisiones, especialmente los derivados del Acuerdo de París.

Optimización de las inversiones en carbono

Desde una perspectiva económica, el modelo facilita la optimización de las decisiones de inversión relacionadas con la adquisición y gestión de créditos de carbono (Gabbatiss, 2023). A través de los coeficientes β obtenidos en el modelo Elastic Net, se proporcionan criterios técnicos objetivos para la selección de proyectos con base en su eficiencia, impacto ambiental y viabilidad económica, promoviendo así una asignación más efectiva de los recursos financieros en el mercado de compensaciones.

Herramienta práctica para las estrategias ESG

En el ámbito empresarial y operativo, el modelo se constituye en una herramienta práctica para la planificación y seguimiento de estrategias ESG (Ambientales, Sociales y de Gobernanza). Permite cuantificar, comparar y priorizar proyectos ambientales mediante indicadores medibles y reproducibles, reforzando la coherencia y la transparencia de las políticas corporativas orientadas a la reducción efectiva de emisiones.

Fomento de la responsabilidad empresarial

Al integrar el paradigma bioético en el marco analítico, el modelo impulsa prácticas empresariales más equitativas, transparentes y sostenibles, promoviendo la responsabilidad ambiental y social de las organizaciones. Este enfoque incentiva la equidad intergeneracional y la ética corporativa en la gestión de proyectos, fortaleciendo la legitimidad de la acción empresarial ante los desafíos globales del cambio climático.

Finalmente, desde una perspectiva aplicada, el modelo se consolida como un Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS) que permite estimar con precisión la capacidad de compensación ecológica, identificar tecnologías y regiones con mayor potencial de reducción, y orientar la asignación eficiente de recursos. De este modo, la investigación no solo contribuye al conocimiento académico, sino que también ofrece una solución técnica y verificable para integrar la sostenibilidad en la práctica de la gerencia de proyectos.

Otras contribuciones

Reflexiones finales y proyección ética

Ante la creciente preocupación por la calidad y la credibilidad de los créditos de carbono, ampliamente documentada en la literatura científica reciente, esta investigación respondió con un análisis exhaustivo y empírico orientado a evaluar la eficacia e integridad del mercado voluntario de compensaciones. El estudio reveló que numerosas variables categóricas, como el país de ejecución, las certificaciones y los tipos de proyecto, no alcanzaron los niveles de significancia estadística esperados, lo que evidencia vacíos estructurales en los estándares de verificación y control de calidad.

Esta constatación pone de relieve la necesidad de fortalecer los mecanismos de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), con el fin de garantizar la adicionalidad y la permanencia de los créditos, y ofrece recomendaciones concretas dirigidas tanto a las entidades certificadoras como a los gestores de proyectos, en torno a la validación, trazabilidad y efectividad de los bonos de carbono voluntarios.

El modelo predictivo basado en Elastic Net permitió identificar patrones geográficos y sectoriales que explican la variabilidad en la compensación de CO₂e. Entre las variables más influyentes destacan los créditos emitidos y los retirados, lo que demuestra el papel determinante de la escala y la trazabilidad. Al mismo tiempo, el modelo evidenció asimetrías significativas entre regiones y sectores, hallazgos que resultan esenciales para orientar políticas públicas y estrategias de inversión hacia los países y tecnologías con mayor potencial de reducción, al tiempo que señalan los contextos en los que las compensaciones actuales resultan menos efectivas. Este conocimiento promueve una asignación más eficiente de recursos, un aspecto crucial para avanzar hacia una gobernanza de proyectos más equitativa, transparente y sustentable.

Por último, la investigación plantea una integración entre los criterios bioéticos y los principios de gobernanza, trascendiendo la visión del modelo como un mero instrumento técnico. Se reivindica la figura del director de proyecto como agente de cambio, dotado de responsabilidad ecológica y social, capaz de conducir los procesos de gestión hacia un futuro sostenible. La incorporación de criterios de justicia ambiental, de participación de las partes interesadas y de ética en la toma de decisiones se establece como un requisito fundamental para la construcción de modelos de compensación legítimos y duraderos.

De este modo, el estudio propone una transformación del liderazgo en la gerencia de proyectos, orientándolo hacia una práctica profesional comprometida con la sostenibilidad integral, en la que la compensación ecológica deja de ser un requisito administrativo para convertirse en un pilar esencial de la responsabilidad ambiental y social corporativa.

7. Conclusiones

El modelo de compensación ecológica, validado mediante el rigor estadístico del enfoque Elastic Net, establece que la eficiencia en la gestión climática constituye un imperativo bioético con repercusiones directas en la gobernanza económica. La investigación trasciende la métrica financiera tradicional al demostrar que la robustez del modelo predictivo representa una garantía tangible de responsabilidad intergeneracional conforme a los principios de justicia ambiental y al reconocimiento del valor intrínseco de los ecosistemas.

El modelo propuesto actúa como un filtro ético y técnico, capaz de penalizar las inversiones en proyectos de baja calidad o con alto riesgo de reversión y de priorizar aquellos que promuevan la equidad ecológica y la transparencia. De esta manera, el aporte del estudio es doble: por un lado, orienta la gobernanza de proyectos para que las estrategias ESG sean verificables, medibles y trazables; y por otro, vincula el éxito económico con el cumplimiento del compromiso moral con la preservación de los sistemas bióticos y abióticos. En consecuencia, el modelo demuestra que el riesgo de ineficacia empresarial, como advierte Økland (2015), es inseparable del riesgo ético, lo que sitúa la sostenibilidad no solo como un objetivo de gestión, sino también como un principio de legitimidad organizacional.

A través de esta investigación se desarrolló la construcción y validación del Modelo de Compensación Ecológica basado en Elastic Net, el cual responde a la carencia disciplinar presente en los estándares de gobernanza de proyectos al ofrecer una herramienta que integra el rigor cuantitativo medido en unidades de CO₂ equivalente (CO₂e) con la exigencia bioética de calidad, trazabilidad y permanencia. El modelo logra estabilidad predictiva al identificar y ponderar las variables esenciales del capital de carbono, lo que permite una toma de decisiones más precisa y responsable en materia de sostenibilidad. Con ello, la compensación ecológica deja de ser un

componente accesorio de mitigación y se consolida como una restricción verificable en la gestión de proyectos, aportando un marco metodológico que fortalece la gobernanza ambiental, la eficiencia económica y la responsabilidad ética. En este sentido, el modelo se convierte en un instrumento integral que vincula la ciencia, la gestión y la ética, contribuyendo a transformar la práctica de la gerencia de proyectos hacia un enfoque verdaderamente sostenible.

El análisis comparativo evidenció una fragmentación metodológica significativa en el tratamiento de la sostenibilidad en los principales estándares de gerencia de proyectos. Mientras que el estándar P5 de Green Project Management (GPM) incorpora de manera integral la sostenibilidad y el enfoque de la Triple Línea Base (económica, social y ambiental), los marcos de referencia más difundidos PMI/PMBOK, IPMA, PRINCE2 e ISO 21500 abordan la compensación ecológica de manera marginal o inexistente. Esta constatación permitió identificar una brecha disciplinar estructural, lo que justificó la necesidad de desarrollar un modelo externo que estandarice la medición y valoración de la compensación ecológica, de modo que la sostenibilidad deje de concebirse como una externalidad y se incorpore como un principio operativo y funcional de la gobernanza de proyectos.

La construcción del modelo se concretó en la formulación de la Ecuación Predictiva Elastic Net, identificada como el método más eficiente y estable al superar la inestabilidad de la Regresión Lineal y la menor precisión del algoritmo Random Forest. Este enfoque alcanzó un alto nivel de parsimonia, al eliminar automáticamente cerca del 66 % de las variables irrelevantes y conservar únicamente los predictores estadísticamente significativos, entre ellos el Tipo de Proyecto y los Créditos Emitidos. El resultado obtenido ofrece a los gerentes de proyecto una herramienta cuantitativa robusta, precisa e interpretativa, basada en la magnitud de los coeficientes β , que

permite estimar, comparar y proyectar la compensación ecológica necesaria en un marco de gobernanza sostenible.

La validación estadística del modelo Elastic Net confirmó la superioridad del enfoque propuesto frente a las metodologías tradicionales, aportando evidencia empírica que respalda las hipótesis centrales de la investigación. Los resultados demostraron que las variables vinculadas al Capital de Carbono y a la Permanencia, como los Depósitos del Fondo de Reserva, presentan coeficientes β positivos y estadísticamente significativos, lo que valida la hipótesis de que la calidad técnica y la responsabilidad ética constituyen los principales predictores de una compensación ecológica efectiva. Al comprobar la estabilidad predictiva del modelo y la relevancia de las variables asociadas a la trazabilidad y a la permanencia, se confirma implícitamente la necesidad de superar la fragmentación metodológica de los estándares de gestión de proyectos e integrar la sostenibilidad como eje central de la gobernanza organizacional.

El principal aporte al conocimiento se fundamenta en la articulación híbrida de paradigmas y en la operacionalización del concepto de compensación ecológica. La investigación establece una vinculación innovadora entre la bioética, con su énfasis en la justicia ecológica y la responsabilidad intergeneracional, el rigor cuantitativo del pospositivismo y la utilidad aplicada del pragmatismo (Tywoniak et al., 2021). Esta integración paradigmática aporta de manera significativa a la teoría de la gobernanza de proyectos, al reinterpretar la Triple Línea Base (TBL) y proponer que la compensación ecológica deje de concebirse como una externalidad ambiental y se convierta en una restricción esencial, medible y verificable en la gestión de proyectos. Con ello, el estudio ofrece a la gerencia moderna una metodología robusta y ética que permite cumplir los objetivos ESG y responder de manera técnica y responsable a los desafíos derivados de la crisis climática actual.

Esta investigación demuestra que la incorporación de enfoques predictivos basados en regularización estadística constituye un avance sustantivo en la gobernanza de proyectos, al transformar la compensación ecológica de un requerimiento normativo reactivo en un componente estratégico, cuantificable y auditable de la gestión. Al operacionalizar la sostenibilidad mediante una función de transferencia basada en la métrica de equivalente de dióxido de carbono (CO_2eq), el estudio contribuye a cerrar la brecha existente entre los estándares tradicionales de gerencia de proyectos y las exigencias contemporáneas de sostenibilidad operativa, promoviendo una gobernanza informada por datos y orientada a la responsabilidad bioética.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados evidencian que la capacidad predictiva alcanzada permite anticipar con alto grado de precisión la magnitud de la compensación requerida, optimizando la asignación de recursos, mitigando riesgos financieros y reputacionales asociados a prácticas no verificables, y fortaleciendo la trazabilidad frente a entes reguladores y grupos de interés. En este sentido, la compensación ecológica deja de concebirse como un costo exógeno para consolidarse como un activo estratégico de gobernanza, alineando de manera técnica y coherente la rentabilidad organizacional con la preservación del equilibrio climático global.

La investigación concluye que la utilidad del modelo desarrollado trasciende la precisión estadística del algoritmo Elastic Net, lo que lo posiciona como un instrumento esencial para la modernización de la gobernanza de proyectos. Al integrar factores como el tipo de estándar de registro, las metodologías de mitigación y la ubicación geográfica en una función de transferencia unificada, se logra transformar datos históricos en decisiones de planeación estratégica.

8. Declaración de uso ético de herramientas digitales

La autora declara que, durante el desarrollo de esta investigación, se utilizaron herramientas digitales de apoyo académico exclusivamente para optimizar la redacción, la coherencia y la presentación del documento, sin que ello implique la generación automática de contenido ni la sustitución del juicio crítico y analítico propio. Todas las interpretaciones, resultados y conclusiones reflejan el trabajo intelectual y la responsabilidad académica de la autora, conforme a los principios de integridad investigativa y de ética universitaria.

Referencias

- Al Shammre, A. S., Benhamed, A., Ben-Salha, O., & Jaidi, Z. (2023). Do Environmental Taxes Affect Carbon Dioxide Emissions in OECD Countries? Evidence from the Dynamic Panel Threshold Model. *Systems, 11*(6), 306 <https://doi.org/10.3390/systems11060307>
- Barajas, P. (2017). Una mirada a la sostenibilidad en la gestión de proyectos A look at Sustainability in Project Management. Sico.org. Recuperado el 12 de octubre de 2025, *Daena: International Journal of Good Conscience* de [http://www.spentamexico.org/v12-n3/A20.12\(3\)328-344.pdf](http://www.spentamexico.org/v12-n3/A20.12(3)328-344.pdf)
- Blanco, A. (2023). Aplicación de la guía del PMBOK 7ª Edición a un proyecto de fabricación de maquetas de automóvil en una PYME. [Tesis de Pregrado, *Universidad de Valladolid*] Repositorio institucional <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/59763/TFG-I-2503.pdf?sequence=1> 10.
- Blicharska, M., Hedblom, M., Josefsson, J., Widenfalk, O., Ranius, T., Öckinger, E., & Widenfalk, L. A. (2022). Operationalisation of ecological compensation – Obstacles and ways forward. *Journal of Environmental Management, 304*(April 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114277>
- Burg Conti, P. H., & Spordeler de Souza, P. V. (2021). La Bioética y sus paradigmas teóricos. *Rev. Bioét., 29*(4). 716–726. <https://doi.org/10.1590/1983-80422021294505>
- Camargo, E., Luengas, L., & Gómez, H. (2012). El paradigma bioético. Una ética para la tecnociencia. *Visión Electrónica, 6*(2), 172–180 .1999. 6, 172–180. <https://doi.org/10.14483/22484728.3889>
- Carboni, J., Gonzalez, M., & Hodgkinson, J. (2013). *The GPM Reference Guide to Sustainability in Project Management*. 166.(S/f-b). Researchgate.net. Recuperado el 12 de mayo de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/282816353_The_GPMR_Reference_Guide_to_Sustainability_in_Project_Management_RCopyright_2013_GPM_Global
- Carter, P., Van de Sijpe, N., & Calel, R. (2021). The elusive quest for additionality. *World Development, 141*, 105393. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105393>

- Charoentanaworakun, C., Somprasong, K., Duongkaew, A., Wongchai, P., Katunyoo, P., & Thanaphanyakhun, P. (2024). Minimum Carbon Credit Cost Estimation for Carbon Geological Storage in the Mae Moh Basin, Thailand. *Energies*, *17*(9).
<https://doi.org/10.3390/en17092231>
- Cole, S., Moksnes, P. O., Söderqvist, T., Wikström, S. A., Sundblad, G., Hasselström, L., Bergström, U., Kraufvelin, P., & Bergström, L. (2021). Environmental compensation for biodiversity and ecosystem services: A flexible framework that addresses human wellbeing. *Ecosystem Services*, *50*(July). <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101319>
- Contento, M. R. (2020). Estadística con aplicaciones en R. En *Estadística con aplicaciones en R*. Recuperado el 30 de noviembre de 2025, de https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/publication/field_attached_file/libro_estadistica_con_aplicaciones_en_r_def_ago_11.pdf <https://doi.org/10.21789/9789587252729>
- Cutler, A., Cutler, D. R., & Stevens, J. R. (2012). Ensemble Machine Learning. *Ensemble Machine Learning*, *January*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7>
- Dibello, J., Portal, D., Greenstein, J., & Hahn, B. (2024). Hidden in Plain Sight. *Journal of Emergency Medicine*, *66*(3), e381–e382. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2023.07.015>
- Domrachev, G. D. G. (2022). Régimen jurídico para la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero como instrumento de protección climática. *Ecología Teórica y aplicada*, 191–197. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-191-197>
- Eisinger, B., Németh, A., Major, Z., & Kegyes-Brassai, O. (2022). Comparative Life Cycle Analyses of Regular and Irregular Maintenance of Bridges with Different Support Systems and Construction Technologies. *Chemical Engineering Transactions*, *94*(April), 571–576. <https://doi.org/10.3303/CET2294095>
- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Informacion Tecnologica*, *23*(1), 163–176. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>

- Ferreira Tilano, B., & Tarazona Sanchez, E. (2017). *Estimación de la huella de carbono de la sociedad portuaria regional Barranquilla utilizando la NTC-ISO14064:2006*. 4(1), 1–23.
- Gloria, D., & Aponte, M. (2022). *Resumen*. 196
23.<https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/89dd752a-9933-44ba-b1f2-c13f65e2f1ba>
- Gogolova, M., Vartiak, L., & Kovalova, E. (2023). Identification of the Starting Points of the Environmental Responsibility of a Transport Company Based on Multi-criteria Analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(4), 120–129.
<https://doi.org/10.32479/ijeeep.14345>
- González, G. (2018). *Integración de la sostenibilidad en los Estándares de Dirección de Proyectos*. Recuperado el 3 de mayo de 2025, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/34024/1/TFG-I-1035.pdf>
- Grand view research. (2025). *Grand view research*. Mercado Voluntario de Créditos de Carbono (2025-2030). Recuperado el 30 de mayo de 2025 de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/voluntary-carbon-credit-market-report>
- Ika, L. A., & Pinto, J. K. (2022). The “re-meaning” of project success: Updating and recalibrating for a modern project management. *International Journal of Project Management*, 40(7), 835–848. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2022.08.001>
- International Carbon Action Partnership (ICAP). (2016). *Emissions Trading Worldwide: Status Report*. 72. Recuperado el 30 de mayo de 2025 de <https://icapcarbonaction.com/component/attach/?task=download&id=152>
- Jean, Mark; Grant, E. (2022). *Management System Enabled ESG Performance*. <https://doi.org/10.1115/IPC2022-86870>
- Jiang, K., Merrill, R., You, D., Pan, P., & Li, Z. (2019). Optimal control for transboundary pollution under ecological compensation: A stochastic differential game approach. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118391>

K Haya, Barbara , Tyler Bernard, Aline Abayo, Xinyun Rong, Ivy S. So, M. E. (2025). *Base de datos de compensaciones de registro voluntario*.

<https://doi.org/https://gspp.berkeley.edu/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database>

Kangas, J., & Ollikainen, M. (2019). Economic Insights in Ecological Compensations: Market Analysis With an Empirical Application to the Finnish Economy. *Ecological Economics*, 159(January), 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.003>

Katsarski, N. (2019). *The new business thinking with integrated reporting*. 855–861.19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2019, Ecology, Economics, Education and Legislation.

Kaushik, V., & Walsh, C. A. (2019). Pragmatism as a research paradigm and its implications for Social Work research. *Social Sciences*, 8(9). doi: 10.3390/socsci8090255. h paradigm and its implications for Social Work research. *Social Sciences*, 8(9), 1–17.

Kehinde, Según. (2018). Integrating sustainability into project risk management. *Global Business Expansion: Concepts, Methodologies, Tools, and Appl.*, 3(2), 330–352. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5481-3.ch017>

Kiran D.R. (2017). *Chapter 35 - ISO 14000 Quality Systems* (pp. 487–498). <https://doi.org/https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1016/B978-0-12-811035-5.00035-0>

Laitila, J., Moilanen, A., & Pouzols, F. M. (2014). A method for calculating minimum biodiversity offset multipliers accounting for time discounting, additionality and permanence. *Methods in Ecology and Evolution*, 1247–1254.

Lee, H., & Mayer, A. (2020). *The Future of Carbon Offset Markets*. October, 1–18.

Belfercenter.org. Recuperado el 30 de noviembre de 2025, de https://www.belfercenter.org/sites/default/files/pantheon_files/files/publication/The%20Future%20of%20Carbon%20Offset%20Markets.pdf

- Lu, S., Li, J., Xiao, B., & Guo, M. (2020). Analysis of standard accounting method of economic compensation for ecological pollution in watershed. *Science of the Total Environment*, 737, 138157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138157>
- Marín, E. Ó., & Enríquez. (2022). La Compensación De Impactos Ambientales En México Y España: Un Esbozo Comparativo Sobre Este Tercer Enfoque Para El Cuidado De La Integridad Ambiental. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 437–480. Recuperado el 30 de mayo de 2025 de <https://www.britannica.com/topic/environmental-law>.
- Martínez Rueda, A. (2016). *Bioética ambiental: fundamentos y aplicaciones en América Latina*. (Pontificia). Recuperado el 30 de mayo de 2025, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-47022020000200055.
- Meena, R. S., Pradhan, G., Singh, K., Kumar, S., Singh, A. K., Shashidhar, K. S., Mina, K. K., & Rao, C. S. (2024). Agriculture models for restoring degraded land to enhance CO₂ biosequestration and carbon credits in the Vindhyan region of India. *Science of the Total Environment*, 929(November 2023), 172661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172661>
- Méndez Sayago, J. A., & Perugache Rodriguez, C. A. (2012). Causalidad y sensibilidad entre precios de los derechos de emisión europeos y los certificados de reducción de emisiones de mecanismos de desarrollo limpio en el mercado europeo de transacción de emisiones. *Estudios Gerenciales*, 28(124), 141–167. [https://doi.org/10.1016/s0123-5923\(12\)70220-6](https://doi.org/10.1016/s0123-5923(12)70220-6)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Manual de compensación por pérdida de biodiversidad*. 1–49. Editorial, C., Sanclemente Manrique, X., Mendoza Páez, M., Cristina, I., Ojeda, Á., Alberto, C., Díaz, M., Caicedo, M. M., Rojas Gutiérrez, P. A., Aristizabal, S., Lucia, O., Arango, O., Rolón Domínguez, S., Roció, L., Alvarado, A., Lucia, M., Calderón, H., Fierro, S. C., ... Montenegro, S. S. (s/f). Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad ministerio de ambiente y desarrollo sostenible viceministerio de ambiente y desarrollo sostenible dirección de bosques, biodiversidad y servicios ecosistémicos. Gov.co. Recuperado el 30 de junio de 2025, de

https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/gestion_en_biodiversidad/180912_manual_compensaciones.pdf

Mojica Vélez, J. M., Barrasa García, S., & Espinoza Tenorio, A. (2018). Policies in coastal wetlands: Key challenges. *Environmental Science and Policy*, 88(February), 72–82.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.06.016>

Moreno Monsalve, N. A., Ariza Aguilera, D. A., Delgado Ortiz, S. M., Diez Silva, M., Macgregor Quintero, I. P., Rivera Forero, J., Sánchez Ayala, L. M., Vargas Walteros, C., & Zuluaga Muñoz, W. (2018). *Dirección y gestión de proyectos Un análisis desde el marco de la sostenibilidad*. Recuperado el 30 de abril de 2025, de <https://editorial.universidadean.edu.co/media/pdf-ean/un-analisis-marco-sostenibilidad.pdf>

Morín, E. (2011). La Via, para el futuro de la humanidad. En *ABC Sevilla* (1ra ed.).
<http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/sevilla/abc.sevilla/2003/10/02/037.html>
ml Edgarmorinmultiversidad.org. Recuperado el 30 de mayo de 2025, de <https://edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-la-via-para-el-futuro-de-la-humanidad.html>

Nie, X., Li, X., Lyu, C., Su, Y., & Wang, H. (2024). Can ecological compensation based on the transfer of development rights (TDR) improve ecosystem service value? A multi-scenario simulation. *Land Use Policy*, 138(100), 107024.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.107024>

Nur, A. R., Jaya, A. K., & Siswanto, S. (2023). Comparative Analysis of Ridge, LASSO, and Elastic Net Regularization Approaches in Handling Multicollinearity for Infant Mortality Data in South Sulawesi. *Jurnal Matematika, Statistika dan Komputasi*, 20(2), 311–319.
<https://doi.org/10.20956/j.v20i2.31632>

Økland, A. (2015). Gap Analysis for Incorporating Sustainability in Project Management. *Procedia Computer Science*, 64(1877), 103–109.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.469>

Paneque, de la Torre; Angela; Slvador, Capuz; Batante, M. J. (2015). *Análisis de los aspectos y*

- principios relacionados con la sostenibilidad en la IPMA ICB4. July*. Recuperado el 30 de mayo de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/320443780_Analisis_de_los_aspectos_y_principios_relacionados_con_la_sostenibilidad_en_la_IPMA_ICB4
- Patón-Romero, J. D., Baldassarre, M. T., Rodríguez, M., & Piattini, M. (2019). Application of ISO 14000 to Information Technology Governance and Management. *Computer Standards and Interfaces*, 65(March), 180–202. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2019.03.007>
- Pröbstl-Haider, V. U., & Ammer, U. (2017). Use of communal forests to establish an ecological accounting system – Current state and new challenges due to the compensation regulation using the example of bavaria | Verwendung von kommunalen wäldern für den aufbau eines ökokontos: Aktueller stand und. *Naturschutz Und Landschaftsplanung*, 164–172.
- Project Management Institute. (2017). PMBOK® Guide Sixth Edition (PMI, 2017). En *Project Management Institute* (Vol. 6). <http://www.citeulike.org/group/14887/article/9008974>
- Ramos, C. A. (2015). Los paradigmas de la investigación científica. *Avances en Psicología*, 23(1), 9–17. <https://doi.org/10.33539/avpsicol.2015.v23n1.167>
- Rinaldi, U. A. (2023). La sostenibilidad ambiental en la gestión de proyectos de construcción. *Aleph*, 87(1,2), 149–200. [https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%2C LUCINEIA CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proces](https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%2C%20LUCINEIA%20CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proces)
- Rivera-Hernández, J. E., Blanco-Orozco, N. V., Alcántara-Salinas, G., Houbbron, E. P., & Pérez-Sato, J. A. (2017). ¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto. *Posgrado y Sociedad. Revista Electrónica del Sistema de Estudios de Posgrado*, 15(1), 57–67. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>
- Ropo, M., Grönman, K., Lakanen, L., Behm, K., & Soukka, R. (2025). Extending the handprint approach for the assessment of circular solutions to study the potential positive climate

impacts of the workplace-as-a-service system. *Cleaner Engineering and Technology*, 24(June 2024). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100897>

Ruiz Gómez, N., & Gaviria Mejía, P. (2017). Estado actual de la sostenibilidad en proyectos de organizaciones sostenibles del Valle de Aburrá. *Repositorio Institucional EAFIT*, 1–146. <http://hdl.handle.net/10784/12323>

SaThierbach, K., Petrovic, S., Schilbach, S., Mayo, D. J., Perriches, T., Rundlet, E. J. E. J. E. J., Jeon, Y. E., Collins, L. N. L. N., Huber, F. M. F. M., Lin, D. D. H. D. H., Paduch, M., Koide, A., Lu, V. T., Fischer, J., Hurt, E., Koide, S., Kossiakoff, A. A., Hoelz, A., Hawryluk-gara, L. A., ... Hoelz, A. (2015). El estado del arte, ¿Necesidad o necesidad? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 3(1), 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2015.06.056><https://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827><https://doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005><https://doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005><https://doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005>

Sekiya, A., & Okamoto, S. (2010). Evaluation of carbon dioxide equivalent values for greenhouse gases: CEWN as a new indicator replacing GWP. *Journal of Fluorine Chemistry*, 131(3), 364–368. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2009.11.020>

Silvius, G. (2019). Making Sense of Sustainable Project Management. *Annals of Social Sciences & Management studies*, 2(4), 106–109. <https://doi.org/10.19080/asm.2019.02.555594>

Su, K., Sun, X., Guo, H., Long, Q., Li, S., Mao, X., Niu, T., Yu, Q., Wang, Y., & Yue, D. (2020). The establishment of a cross-regional differentiated ecological compensation scheme based on the benefit areas and benefit levels of sand-stabilization ecosystem service. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122490. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122490>

Trencher, G., Nick, S., Carlson, J., & Johnson, M. (2024). Demand for low-quality offsets by major companies undermines climate integrity of the voluntary carbon market. *Nature Communications*, 15(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51151-w>

- Tywoniak, S., Ika, L., & Bredillet, C. (2021). A Pragmatist Approach to Complexity Theorizing in Project Studies: Orders and Levels. *Project Management Journal*, 52(3), 298–313. <https://doi.org/10.1177/8756972821999501>
- Villena, E. G., Villar, S. G., Dzul López, L. A., Álvarez, R. M., Noya, I. D., & Vidal Mazón, J. L. (2021). Approach to a project framework in the environment of sustainability and corporate social responsibility (CSR): Case study of a training proposal to a group of students in a higher education institution. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131910880>
- Wang, L., Lv, T., Zhang, X., Hu, H., & Cai, X. (2022). Global research trends and gaps in ecological compensation studies from 1990 to 2020: A scientometric review. *Journal for Nature Conservation*, 65(May 2021), 126097. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126097>
- Wei, W. Jian Wei, G. (2018). Análisis del método de contabilidad de compensación ecológica interregional basado en el proceso de jerarquía analítica. *Papel Asia*, 79–82.
- Wende, W., Tucker, G.-M., Quetier, F., Rayment, M., & Darbi, M. (Eds.). (2018). Biodiversity offsets: European perspectives on no net loss of biodiversity and ecosystem services (2018a ed.). Springer International Publishing.
- Williams, B. A., Metzger, J. P., Cho, F., Phelan, A., López-Cubillos, S., Bentley, L. K., Fu, B., Zhang, Y., Liu, Y., Johnson, J., & Rhodes, J. R. (2025). Telecoupling cannot be ignored for the forest-based carbon market. *BioScience*, 75(1), 61–67. <https://doi.org/10.1093/biosci/biae102>
- Xiong, Z., & Li, H. (2019). Ecological deficit tax: A tax design and simulation of compensation for ecosystem service value based on ecological footprint in China. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1128–1137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.172>
- Xu, Mengjia; Yan, Wang ; Changxin, Zou; Dong, L. (2019). Simposio Internacional de Geociencias y Teledetección IEEE 2019. *IGARSS 2019 - Simposio Internacional de Geociencias y Teledetección IEEE 2019*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897957>

- Xu, L., Yu, B., & Li, Y. (2015). Compensación ecológica basada en la disposición a aceptar la conservación de las fuentes de agua potable. *Fronteras de la ciencia y la ingeniería ambiental*, 58–65. [Ihttps://doi.org/10.1007/s11783-014-0688-3](https://doi.org/10.1007/s11783-014-0688-3)
- Yamasaki. (2014). Genetic Exchange NIH Public Access. *Bone*, 23(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.041>.Environmental
- Yan, W., Liu, Y., Chen, Y., Zhang, Z., Zhu, X., & Song, G. (2020). Research on a regional ecological compensation mechanism based on an improved footprint model and ecosystem service value. IOP conference series. *Earth and environmental science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/4/042017>
- Yu, B., Xu, L., & Wang, X. (2016). Ecological compensation for hydropower resettlement in a reservoir wetland based on welfare change in Tibet, China. *Ecological Engineering*, 96, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.047>
- Yu, S., Cui, B., Gibbons, P., Yan, J., Ma, X., Xie, T., Song, G., Zou, Y., & Shao, X. (2017). Towards a biodiversity offsetting approach for coastal land reclamation: Coastal management implications. *Biological Conservation*, 214(December 2016), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.07.016>
- Zhang, Y., Guan, D., Wu, L., Su, X., Zhou, L., & Peng, G. (2022). How can an ecological compensation threshold be determined? A discriminant model integrating the minimum data approach and the most appropriate land use scenarios. *Science of the Total Environment*, 852(66), 158377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158377>
- Zhao, H., & Lin, B. (2025). Integrating voluntary carbon offsets into the carbon border adjustment mechanism through multi-objective optimisation of REDD+ funds. *Journal of Environmental Management*, 388(February). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126019>
- Zheng, De Feng. Zang, Zheng. Su, L. (2013). Contabilización de los estándares de compensación ecológica en la provincia de Jilin mediante el método de progresión de catástrofes. *Revista de Ecología y Medio Rural*, 29, 537–540. <https://doi.org/2-s2.0-84906911581>

Anexos

Anexo A

Modelado Estadístico y Ecuaciones del Ejercicio Predictivo

El presente anexo detalla el soporte matemático, estadístico y operativo de las metodologías cuantitativas implementadas en la investigación. En particular, se describe el uso del modelo de regularización Elastic Net como herramienta central para estimar la alícuota de compensación ecológica expresada en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). Este anexo tiene como propósito garantizar la transparencia metodológica, la replicabilidad del ejercicio y la trazabilidad de los resultados obtenidos.

A.1 Fundamento del modelo Elastic Net

El modelo Elastic Net se fundamenta en la optimización de una función de pérdida que combina las penalizaciones de los métodos LASSO (L1) y Ridge (L2), permitiendo simultáneamente la selección de variables relevantes y la estabilización de los coeficientes estimados. Siguiendo a Hair et al. (2014), esta técnica resulta especialmente adecuada en contextos de análisis multivariado donde existe alta dimensionalidad, multicolinealidad entre predictores y muestras de naturaleza no probabilística, como ocurre en los mercados voluntarios de carbono.

La ecuación general que rige el ejercicio predictivo se expresa como:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \left(\sum_{i=1}^n (y_i - x_i^T \beta)^2 + \lambda \left[\frac{1-\alpha}{2} \|\beta\|_2^2 + \alpha \|\beta\|_1 \right] \right)$$

Donde:

- y_i : representa la variable dependiente del modelo, correspondiente a la compensación ecológica medida en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq).
- x_i : corresponde al vector de variables predictoras, que incluye características del proyecto tales como estándar de certificación, metodología aplicada, localización geográfica, tipo de proyecto y variables operativas asociadas.
- λ : es el parámetro de regularización que controla la intensidad de la penalización total aplicada al modelo, permitiendo balancear el ajuste y la complejidad.
- α : es el parámetro de mezcla que define la proporción entre penalización Lasso y Ridge. Cuando $\alpha = 1$, el modelo se comporta como Lasso (favoreciendo la esparsidad y selección de variables); cuando $\alpha = 0$, se aproxima a Ridge (priorizando la estabilidad de los coeficientes).

Esta formulación permite capturar relaciones estructurales complejas entre las variables del mercado de carbono, reduciendo el riesgo de sobreajuste y mejorando la capacidad de generalización del modelo.

A.2 Adecuación de los datos y tratamiento de las unidades de medida

Con el fin de garantizar la convergencia del modelo y la coherencia interna de los resultados, se aplicaron diversas transformaciones estadísticas y operativas sobre la base de datos, siguiendo la descripción técnica y las limitaciones documentadas por Haya et al. (2025):

Transformación de variables categóricas

Las variables cualitativas asociadas a los estándares de registro y certificación (VCS, Gold Standard, ACR, CAR) fueron transformadas mediante la técnica de *One-Hot Encoding*. Este procedimiento permitió convertir categorías nominales en vectores binarios, asegurando su correcta incorporación en la función de pérdida del modelo sin introducir sesgos ordinales



artificiales.

Estandarización de la métrica de salida

Todas las salidas del modelo fueron expresadas en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq), estableciendo una métrica homogénea que permite la comparación transversal entre proyectos, metodologías y registros. Esta decisión responde a la diversidad de formatos de reporte identificados en los registros voluntarios y asegura la consistencia técnica del ejercicio predictivo.

Tratamiento de la dimensión temporal

Se realizó un ajuste de los periodos de reporte con el fin de alinear las fechas de emisión, retiro y verificación de créditos con los años de análisis. Este procedimiento resolvió la fragmentación temporal presente en la base de datos original y permitió una lectura coherente de la evolución anual de la compensación, fortaleciendo la estabilidad de las estimaciones.

A.3 Validación de la robustez predictiva del modelo

La validez del ejercicio predictivo se evaluó mediante métricas de desempeño ampliamente aceptadas en el análisis multivariado, conforme a los criterios establecidos por Hair et al. (2014). En particular, se utilizaron las siguientes métricas:

Coefficiente de determinación (R^2)

Esta métrica indica la proporción de la varianza de la compensación ecológica explicada por el conjunto de variables predictoras:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

En el presente estudio, el modelo alcanzó un R^2 ajustado de 0,77, lo que evidencia una alta capacidad explicativa y una estructura funcional estable entre las variables seleccionadas.

Error cuadrático medio (RMSE)

El RMSE se utilizó para cuantificar la precisión del modelo en unidades reales de carbono, permitiendo evaluar el error promedio de predicción:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Esta métrica facilita la interpretación operativa del error y refuerza la aplicabilidad del modelo en contextos reales de toma de decisiones.

A.4 Justificación de la aplicabilidad del modelo en la gobernanza de proyectos

A diferencia de los modelos de aprendizaje automático de tipo “caja negra”, la formulación matemática del Elastic Net permite interpretar directamente los coeficientes seleccionados, lo que constituye una ventaja clave para la gobernanza de proyectos. Cada coeficiente refleja el peso funcional de una variable específica en la determinación de la compensación ecológica, lo que permite identificar explícitamente los factores técnicos, metodológicos o geográficos que influyen en el resultado.

Esta característica transforma la compensación ecológica de un concepto normativo o declarativo en una herramienta de gestión cuantificable, auditable y replicable, alineada con los principios de transparencia, control y rendición de cuentas. En consecuencia, el modelo no solo cumple una función predictiva, sino que se consolida como un instrumento operativo para la toma de decisiones estratégicas en la gerencia de proyectos ambientales.

Anexo B

Contenido de la base de datos

La Base de Datos de Compensaciones del Registro Voluntario v2025-04, Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley, Universidad de California, Berkeley. Contiene las siguientes variables, y en la tabla siguiente se puede observar el diccionario que explica cada una de ellas y que está dentro del libro de Excel, como complemento de la base de datos. En la tabla 7 se exponen el detalle y la descripción de las variables de esta base de datos.

Tabla 38

Variables contenidas en la base de datos de compensaciones de registro voluntario v2025-04, Proyecto de comercio de carbono Berkeley

Encabezado de columna	Detalles y descripción	Datos obtenidos de los registros
ID del proyecto	El número de identificación asignado por los registros.	Sí
Project Name	Name of the project on the registry.	Sí
Registro voluntario	El registro de créditos de carbono que emite y rastrea dichos créditos.	
Proyecto ARB / WA	ARB Compliance o ARB Early Action = proyectos enumerados en la tabla de Emisiones y Retiros de ARB WA = Proyecto Listado en la tabla de Emisión de Compensaciones Ecológicas De Washington No = todos los demás proyectos; esto puede incluir proyectos	

elegibles para ARB y WA que aún no han pasado a las listas de proyectos de ARB y WA

Estatus voluntario	El estado del proyecto en el mercado voluntario, según lo establecido en el registro.	Sí
Alcance	Cada proyecto se encuentra dentro del alcance definido en este documento.	
Tipo	Cada proyecto se clasifica en un tipo según las definiciones de este documento. Cada tipo de proyecto se clasifica en: reducciones, eliminaciones permanentes, eliminaciones de larga duración o mixtas. Las reducciones constituyen la mayoría de los créditos hasta la fecha y corresponden a proyectos que reducen las emisiones que ingresan a la atmósfera. Las eliminaciones son tipos de proyectos que extraen principalmente carbono de la atmósfera. Los mixtos son tipos de proyectos que pueden generar tanto reducciones de emisiones como eliminaciones de carbono; ACR separa algunos proyectos en sus componentes de reducción y de eliminación (consulte la columna Eliminación verificada de ACR Issuances.csv). Los proyectos que capturan y secuestran emisiones de una chimenea u otra actividad humana se consideran reducciones, ya que reducen efectivamente las emisiones, excepto si provienen de una fuente renovable, como la biomasa, en cuyo caso el proyecto se considera absorción.	
Reducción / Eliminación	Define la elegibilidad, los métodos de cálculo de emisiones y los requisitos de monitoreo para tipos específicos de proyectos. Las metodologías se pueden encontrar en los enlaces incluidos en READ FIRST. La metodología es sinónimo de protocolo. Armonizamos el nombre de la metodología utilizando el diccionario methodology_mapping, disponible en nuestro repositorio de GitHub.	reducción y remoción
Metodología / Protocolo	Define la elegibilidad, los métodos de cálculo de emisiones y los requisitos de monitoreo para tipos específicos de proyectos. Las metodologías se pueden encontrar en los enlaces incluidos en READ FIRST. La metodología es sinónimo de protocolo. Armonizamos el nombre de la metodología utilizando el diccionario methodology_mapping, disponible en nuestro repositorio de GitHub.	Metodología del cálculo de las emisiones
Versión de la metodología	La versión de la metodología sí está en la lista. Si un proyecto utiliza más de una metodología, las versiones enumeradas se separan por comas en el orden en que se enumeran.	
Región	Las regiones se definen en la pestaña Regiones del mundo utilizando las clasificaciones de la División de Estadística de las Naciones Unidas. Los proyectos de transporte marítimo internacional no registrados en ningún país en particular se clasifican como "internacionales", al igual que los que abarcan varios países.	
País	El país donde se desarrolla el proyecto. Los proyectos catalogados como "internacionales" incluyen reducciones de emisiones del transporte marítimo internacional y proyectos que se llevan a cabo en varios países.	Sí
Estado	El estado o la provincia donde se lleva a cabo el proyecto.	Sí
Ubicación del sitio del proyecto	Sitio específico / ubicación más detallada del proyecto.	Sí
Desarrollador de proyectos	La persona u organización responsable del desarrollo del proyecto de carbono. A menudo es el propietario de la instalación, del proyecto o del consultor de compensación.	Sí
Total de créditos emitidos	El número total de créditos emitidos por el registro desde el inicio del proyecto. Las tablas completas de emisión de registros sin procesar están disponibles en nuestro repositorio de GitHub. A partir de la versión 6, las cifras de emisión no incluyen los créditos del grupo de búfer. Las cifras de emisión tampoco incluyen las reducciones de emisiones planificadas (PER) Gold Standard, que son créditos ex ante que representan las reducciones futuras esperadas. Estos se	CREDITOS EMITIDOS

Total de créditos retirados	<p>suman por separado. Tenga en cuenta que los totales de créditos emitidos para VCS incluyen todos los créditos de una cosecha, siempre que se hayan emitido. Esto es diferente de cómo VCS informa sobre las emisiones (consulte la pestaña de preguntas frecuentes para obtener una descripción más detallada). El número total de créditos retirados o cancelados desde el inicio del proyecto. Los créditos se marcan como retirados una vez que un propietario notifica al registro que se utilizan para fines de cumplimiento o de emisiones voluntarias. Una vez que esto ocurre, los créditos ya no pueden venderse a otro comprador. Los detalles sobre retiros y cancelaciones, incluidos los números de serie de crédito y, a veces, el titular de la cuenta que retira los créditos, se pueden encontrar en las tablas de retiros y cancelaciones del registro sin procesar. Tenga en cuenta que Gold Standard asigna algunos créditos como "asignados". Los créditos asignados indican la intención de utilizarlos para compensar reclamaciones futuras. La mayoría de estos créditos corresponden a proyectos de forestación y reforestación que emiten créditos de secuestro futuro; incluimos también los créditos asignados en los recuentos de jubilación.</p>
Total de créditos restantes	<p>La diferencia entre los créditos emitidos y los créditos retirados por año (el año en que se produjo la reducción/eliminación). No todos los créditos restantes están disponibles para su compra, ya que algunos compradores pueden usarlos para un compromiso climático sin notificar al registro, o bien conservarlos para uso futuro o reventa. A partir de la v6, los créditos del fondo de amortiguación reservados por los registros para cubrir el riesgo de reversiones de proyectos forestales y otros proyectos de uso de la tierra están excluidos de esta columna. Todos los registros mantienen un fondo de créditos reservados como seguro contra el riesgo de que los créditos de carbono generados por proyectos de almacenamiento de carbono, como bosques y pastizales, se liberen nuevamente a la atmósfera. Para cada proyecto, esta columna suma los créditos del grupo de búferes depositados en todos los años de emisión. Los valores consideran los ajustes del grupo de búferes, como cuando los créditos se transfieren del registro a ARB, con diferentes cantidades de créditos emitidos o depositados en el grupo de búferes de ARB, y cuando los créditos del grupo de búferes se devuelven al proyecto como emisiones. Los créditos utilizados para cubrir las reversiones no se deducen de este recuento del fondo de reserva.</p>
Depósitos totales del fondo de reserva	<p>Los valores consideran los ajustes del grupo de búferes, como cuando los créditos se transfieren del registro a ARB, con diferentes cantidades de créditos emitidos o depositados en el grupo de búferes de ARB, y cuando los créditos del grupo de búferes se devuelven al proyecto como emisiones. Los créditos utilizados para cubrir las reversiones no se deducen de este recuento del fondo de reserva.</p>
Reversiones cubiertas por el grupo de búferes	<p>Total de créditos del fondo de amortiguación utilizados en compensación por la reversión del proyecto.</p>
Inversiones no cubiertas por el grupo de búferes	<p>Créditos emitidos utilizados como compensación por una reversión del proyecto. ARB, Gold y Verra no permiten que el fondo de amortiguación cubra reversiones intencionales ni pérdidas causadas por eventos bajo el control del proponente del proyecto. Todas las revisiones enumeradas en esta columna deben ser reemplazadas por el proponente del proyecto.</p>
Créditos de búfer liberados al proyecto	<p>Total de créditos de búfer devueltos al desarrollador del proyecto como emisiones. Por ejemplo, VCS permite que algunos créditos de búfer se conviertan en emisiones a lo largo del tiempo para proyectos que nunca experimentan una reversión.</p>
Primer año de proyecto	<p>El primer año de cosecha en el que se produjeron reducciones/eliminaciones acreditadas.</p>

Créditos emitidos por año de cosecha: 1996 - 2025	Créditos emitidos por año en que ocurrieron las reducciones/eliminaciones. Para ver el año en que se emitieron los créditos, consulte la columna "Créditos emitidos por año de emisión". Las emisiones para proyectos ARB se calculan a partir del registro y las emisiones ARB, excepto para los proyectos de cumplimiento VCS-ARB, se obtienen solo de la tabla de Emisiones y Retiros de ARB.	
Créditos retirados o cancelados: 1996 - 2025	Créditos retirados o cancelados en el año de su retirada o cancelación. Los retiros de proyectos ARB comprenden los retiros voluntarios enumerados en los registros, así como los de cumplimiento enumerados en la tabla de emisión de ARB. Los retiros de ARB ocurren en 2014, 2017 y 2020 para los períodos de cumplimiento 1, 2 y 3, respectivamente; los créditos retirados del 4.º período de cumplimiento en 2022, 2023 y 2024. Las tablas de retiros del registro pueden enumerar a quienes retiraron los créditos.	
Créditos retirados o cancelados en: Año desconocido o	Créditos retirados sin fecha de retirada, incluidos los créditos de cumplimiento de ARB retirados por Quebec y los retirados voluntariamente.	
Créditos restantes por añada: 1996 - 2024	Créditos restantes (emitidos y no retirados ni cancelados) por año de cosecha. Algunas añadas presentan valores restantes negativos debido a pequeñas discrepancias entre la emisión del registro, el grupo de búferes y los datos de retirada.	
Propietario del proyecto	La organización, la empresa o el individuo propietario del proyecto.	Sí
Operador de proyecto de desplazamiento	La organización, empresa o individuo que opera el proyecto.	Sí
Designado autorizado del proyecto	La organización, empresa o individuo que tiene derecho a rechazar previamente los créditos emitidos.	Sí
Verificador	Cada registro requiere que un tercero certificado verifique que el proyecto cumple con los requisitos del protocolo y que las reducciones declaradas asociadas a cada emisión se monitoreen e informen conforme a dichos requisitos.	Sí
Reducciones anuales estimadas de emisiones PERs (Créditos emitidos en años futuros)	Algunos registros registran las reducciones de emisiones que el desarrollador espera producir anualmente, según se presenta en los primeros documentos del proyecto.	Sí
	Créditos ex ante, emitidos antes de que se realicen las reducciones de emisiones de carbono. Los proyectos de reforestación y forestación, por ejemplo, pueden vender créditos por el crecimiento futuro esperado de los árboles.	

Registro / ARB / WA	Para fines de filtrado y clasificación, los proyectos ARB enumerados en la tabla de Emisiones y Retiros de ARB se enumeran en esta columna como "ARB" en lugar del registro que inicialmente emitió los créditos. Los proyectos de WA enumerados en la tabla de emisiones de WA se consignan en esta columna como "WA".	
Estado de ARB / WA	Algunos proyectos de los registros ACR, CAR y Verra también están registrados en los programas de compensación de la Junta de Recursos del Aire de California (ARB) o de Washington (Ecología). Estos proyectos pueden generar créditos que cumplan con los requisitos reglamentarios, de modo que los emisores regulados los utilicen para cumplir con los requisitos de tope y comercio de los estados. Estos proyectos utilizan protocolos de cumplimiento aprobados por ARB o por Ecología, o fueron aceptados como proyectos de acción temprana en los primeros años del programa de compensación de ARB. Tenga en cuenta que algunos proyectos de acción temprana de ARB están listados por CAR y ACR como "no elegibles" para el cumplimiento.	Sí
Identificación ARB / WA	ARB y Ecología asignaron a cada uno de sus proyectos un número de identificación.	Sí
ID de PoA / ID agregado	Algunos registros permiten que varios proyectos similares participen en un grupo para reducir los costos de transacción. En esta columna se muestra el identificador del proyecto paraguas. Gold Standard llama al proyecto paraguas un PoA (Programa de Actividades), que puede incluir múltiples AVA (Actividades de Proyecto Verificadas) individuales. Gold Standard enumera el número de PoA para la mayoría de los AVA. Para los proyectos que Gold Standard designa como AVA, pero no incluye el número de PoA, incluimos "VPA" en esta columna en azul. Para los proyectos que Gold Standard designa como PoA, agregamos el ID de PoA a esta columna en azul.	
Estado de PoA / AVA	Ya sea que un proyecto sea un PoA, un VPA o independiente.	
Elegible para CORSIA Proyecto listado	Sí = Proyectos para los cuales todos o algunos créditos son elegibles para su uso bajo el Esquema de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA). No = Todos los demás proyectos.	Sí
Proyecto registrado	Según esté disponible, la fecha en que el proyecto se incluyó en el registro.	Sí
	Según esté disponible, la fecha en que el proyecto fue aprobado como proyecto de compensación registrado.	Sí
Certificaciones de sostenibilidad	Esta columna contiene Notas de registro sobre las certificaciones con el sello CCP del Consejo de Integridad para el Mercado Voluntario de Carbono (ICVCM) y los Estándares de Clima, Comunidad y Biodiversidad (CCB) de Verra.	Registro sobre las certificaciones bajo el sello CCP del Consejo de Integridad para el Mercado Voluntario de

Documentos de registro del Sitio web del proyecto	Enlace a la página de registro con los documentos del proyecto. Web externa del proyecto.	
Créditos Emitidos por Año de Emisión: 1996 - 2025	Créditos emitidos por año de emisión. Para ver el año en que se produjeron las reducciones/retiradas acreditadas (vintage), consulta las columnas Créditos emitidos por año de cosecha. Pueden transcurrir dos años o más entre el final del período de presentación de informes y la emisión de créditos por parte de los registros. Para los proyectos ARB, consideramos que los créditos se emitieron en el año de emisión indicado en la pestaña Emisiones y retiros de ARB. Mientras que CAR, ACR, Gold Standard y ARB enumeran las emisiones por período de informe, VCS enumera los créditos por período de informe (Cantidad total de antigüedad) y, por separado, por fecha de emisión (Cantidad de créditos emitidos), ya que los créditos de un solo período de informe pueden emitirse en varios lotes. Para tratar las emisiones de VCS de manera similar a los demás registros y brindar una imagen precisa de los créditos restantes, estas columnas incluyen todos los créditos en un período de informe (Cantidad total de cosecha) del año en que los créditos aparecen por primera vez en la base de datos de VCS, es decir, la primera fecha de emisión de crédito para cada período de informe.	
Descripción del proyecto	Descripción ampliada del proyecto.	Sí
Notas del Registro del Proyecto de Comercio de Carbono de Berkeley	Notas del registro.	Sí
Fecha proyecto agregado a la base de datos	Notas añadidas por nuestro equipo. Aquí compartimos algunos hallazgos y el contexto descubiertos durante nuestro procesamiento de datos. Nota: mos que el desarrollador cambia para algunos proyectos, pero no para todos. La versión de la base de datos cuando el proyecto apareció por primera vez en el registro, denominada por la fecha en que se descargaron los datos.	

Nota. Tomado de (K Haya, et al., 2025)

