REPORTE DE RESULTADOS DE PREDICCIÓN DE LA VARIABLE CORRUPCIÓN AMPLIA

Detalles sobre el presente reporte

- Fecha: 05 de febrero de 2024
- Nivel de observación: año inicial del reporte por municipalidad y año.
- Variables predictoras: únicamente provenientes de la base de datos de SIAF
- Variable predicha: corrupción amplia
- Periodo en el que fue entrenado el modelo: 2016-2020
- Periodo de predicción: 2009-2020
- Tipo de predicción: clasificación
- Ejecución N°8

Número de variables

La tabla 1 presenta información sobre el número de variables predictoras en la base de datos empleada, cuyo nivel de observación es año inicial del reporte por municipalidad y año.

Tabla 1. Número de variables predictoras antes y después del preprocesamiento

Fuente	Número de variables predictoras antes del preprocesamiento	Número de variables predictoras después del preprocesamiento
SIAF	17 549	14 317
Fuente: elaboración propia		

Métodos de (re)muestreo

Se implementaron tres métodos de (re)muestreo sobre el conjunto de entrenamiento para balancear el número de observaciones por categoría de predicción. El conjunto de prueba mantiene su proporción original.

Tabla 2. Número de observaciones por categoría de predicción según método de (re)muestreo

Método de muestreo	Total de observaciones	Total de observaciones en las que sí ocurrió corrupción amplia	Total de observaciones en las que no ocurrió corrupción amplia
Original	964	891	73
SMOTE	1 782	891	891
SMOTE Tomek-Links	1 776	888	888
Naive Random Oversampling	1 782	891	891
Fuente: elaboración propia			

Hiperparámetros considerados en el Grid Search

Se utilizó el algoritmo gridsearchcv para realización una búsqueda exhaustiva de la mejor combinación de hiperparámetros (Grid Search). Los rangos de hiperparámetros considerados se presentan en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Hiperparámetros considerados en el Grid Search de los Métodos Basados en Árboles

Modelo	n_estimators	max_depth	max_features
Random Forest	250, 500 y 1000	10, 20 y 30	20%, 30%, 40%
Gradient Boosting Trees	250, 500 y 1000	1 y 2	20%, 30%, 40%
LGBM Classifier	250, 500 y 1000	1 y 2	-
Regression Forest	252, 500 y 1000	10, 20 y 30	-
Fuente: elaboración propia			

Tabla 4. Hiperparámetros considerados en el Grid Search de los Métodos de Regularización

Modelo	Cs (Fuerza de la regularización)
Lasso	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 y 100
Ridge	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 y 100
Elastic Net	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 y 100
Fuente: elaboración propia	

También debe considerarse que en el Grid Search se empleó, para todos los modelos, una validación cruzada en K-Folds, donde k siempre tuvo el valor de 5.

Resultados (métricas de desempeño)

La tabla 5 presenta los resultados de los modelos de Machine Learning para el conjunto de entrenamiento NRO. Tomando en cuenta la métrica F1, el modelo con el mejor desempeño es el modelo **Regression Forest** entrenado con el conjunto de entrenamiento Naive Random Oversampling (NRO). Las combinaciones óptimas de hiperparámetros se reportan en los anexos 1 y 2.

Tabla 5. Métricas de desempeño de los modelos entrenados con el conjunto de entrenamiento Naive Random Oversampling.

Métrica	Regresión Logística	Lasso	Ridge	Elastic Net	Random Forest	Gradient Boosting Trees	LGBM Classifier	Regression Forest
F1	0.536	0.542	0.542	0.542	0.590	0.565	0.549	0.644
Accuracy	0.845	0.783	0.783	0.783	0.903	0.911	0.913	0.891
AUC ROC	0.566	0.632	0.632	0.632	0.734	0.775	0.684	0.804
F1 (Sí)	0.915	0.874	0.874	0.874	0.948	0.953	0.954	0.941
F1 (No)	0.158	0.211	0.211	0.211	0.231	0.178	0.143	0.348
Fuente: elaboración propia								

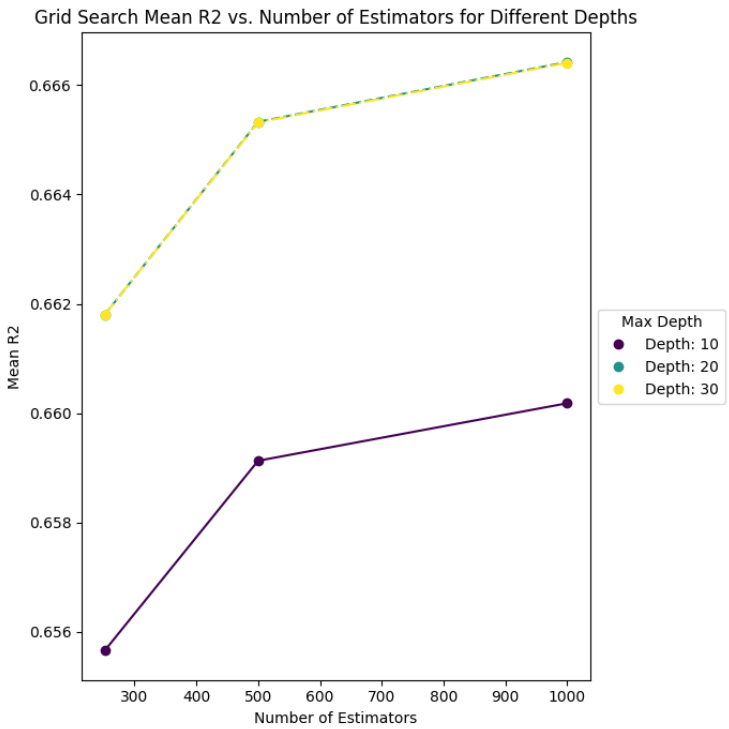
Asimismo, se presentan los 5 modelos con mejor considerando los distintos métodos de remuestreo empleados (SMOTE, SMOTE Tomek-Links y Naive Random Oversampling). Este ranking se realiza teniendo en cuenta la métrica F1:

Tabla 6. Cinco modelos con mayor poder predictivo considerando los distintos métodos de remuestreo

Modelo	F1
Regression Forest NRO	0.644
Regression Forest S	0.628
Regression Forest ST	0.620
Random Forest NRO	0.590
Random Forest ST	0.569
Fuente: elaboración propia	

El gráfico 1. Muestra el ajuste del modelo óptimo (**Regression Forest** entrenado con el conjunto de Naive Random Oversampling) a través de los distintos hiperparámetros considerados durante el proceso de Grid Search.

Gráfico 1. Grid Search R2 vs. Grid Search Parameters for the NRO Regression Forest Model



Variables más importantes según el criterio de impureza de Gini

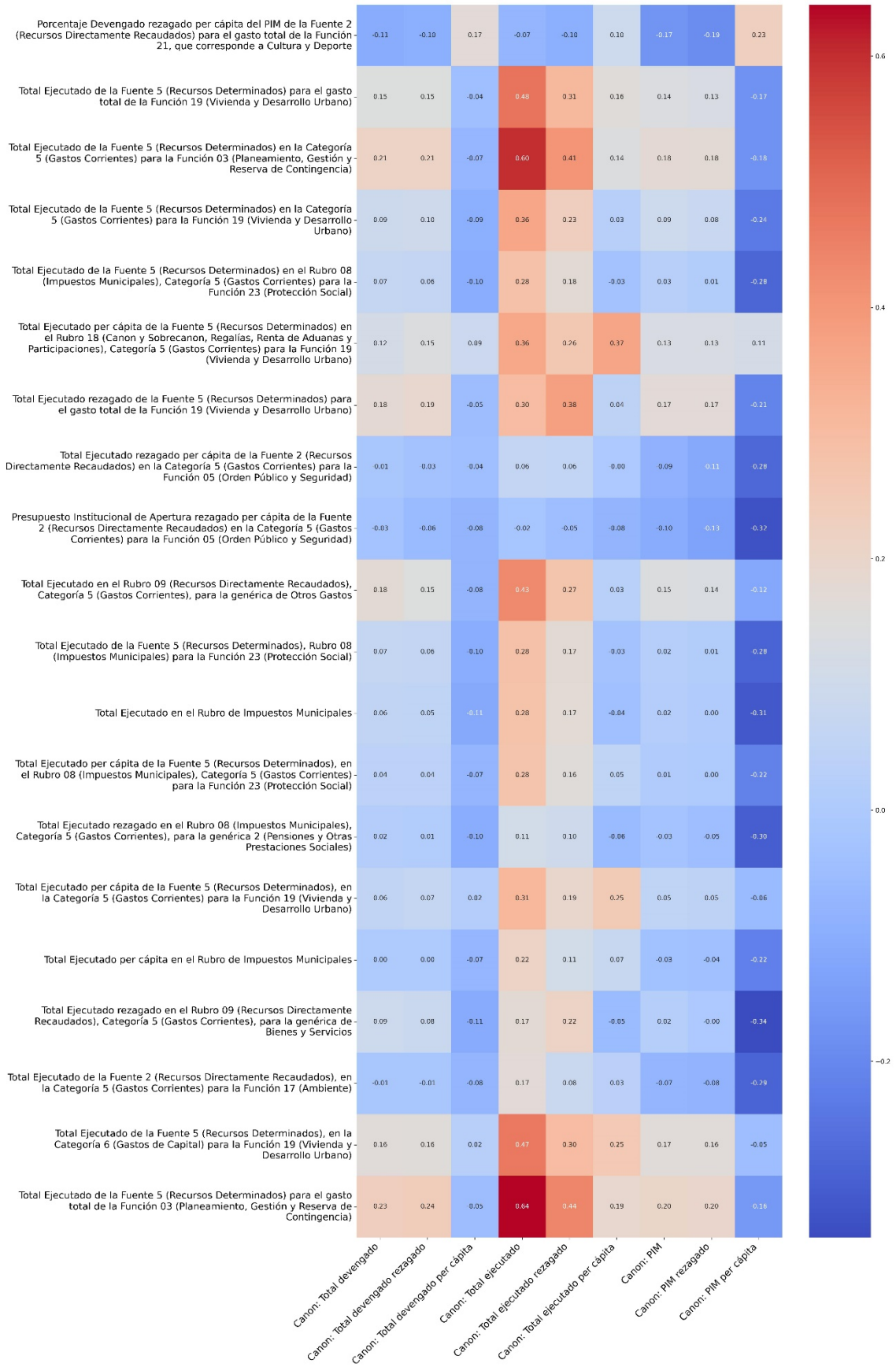
En esta sección se presentan las 20 variables más importantes según el criterio de impureza de Gini (estimado mediante el comando feature importance) para el modelo óptimo.

Tabla 7. Veinte variables más importantes de acuerdo con el criterio de impureza de Gini

Variable	Etiqueta	Importance Score
_devppimtotfun_f2cydeppc	Porcentaje Devengado rezagado per cápita del PIM de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) para el gasto total de la Función 21, que corresponde a Cultura y Deporte	0.083
tejgtotfun_f5viv	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.063
tejgfun_f5ct05pgrco	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 03(Planeamiento, Gestión y Reserva de Contingencia)	0.055
tejgfun_f5ct05viv	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.049
tejgfun_f5r08ct05prots	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en el Rubro 08 (Impuestos Municipales), Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 23 (Protección Social)	0.036
tejgfun_f5r18ct05vivpc	Total Ejecutado per cápita de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en el Rubro 18 (Canon y Sobrecanon, Regalías, Renta de Aduanas y Participaciones), Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.036
_tejgtotfun_f5viv	Total Ejecutado rezagado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.034
_tejgfun_f2ct05opsegpc	Total Ejecutado rezagado per cápita de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 05 (Orden Público y Seguridad)	0.027
_piagfun_f2ct05opsegpc	Presupuesto Institucional de Apertura rezagado per cápita de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 05 (Orden Público y Seguridad)	0.027
tejgge_r09ct05otgst	Total Ejecutado en el Rubro 09 (Recursos Directamente Recaudados), Categoría 5 (Gastos Corrientes), para la genérica de Otros Gastos	0.025
tejgtotfun_f5r08prots	otal Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados), Rubro 08 (Impuestos Municipales) para la Función 23 (Protección Social)	0.015
tejgrb_impm	Total Ejecutado en el Rubro de Impuestos Municipales	0.014
tejgfun_f5r08ct05protspc	Total Ejecutado per cápita de la Fuente 5 (Recursos Determinados), en el Rubro 08 (Impuestos Municipales), Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 23 (Protección Social)	0.013
_tejgge_r08ct05popso	Total Ejecutado rezagado en el Rubro 08 (Impuestos Municipales), Categoría 5 (Gastos Corrientes), para la genérica 2 (Pensiones y Otras Prestaciones Sociales)	0.012
tejgfun_f5ct05vivpc	Total Ejecutado per cápita de la Fuente 5 (Recursos Determinados), en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.012
tejgrb_impmpc	Total Ejecutado per cápita en el Rubro de Impuestos Municipales	0.011
_tejgge_r09ct05biser	Total Ejecutado rezagado en el Rubro 09 (Recursos Directamente Recaudados), Categoría 5 (Gastos Corrientes), para la genérica de Bienes y Servicios	0.011
tejgfun_f2ct05ambpc	Total Ejecutado de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados), en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 17 (Ambiente)	0.01
tejgfun_f5ct06viv	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados), en la Categoría 6 (Gastos de Capital) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.009
tejgtotfun_f5pgrco	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 03 (Planeamiento, Gestión y Reserva de Contingencia)	0.008

Asimismo, se visualiza la correlación entre las 20 variables más importantes según el criterio de impureza de Gini y las variables de Canon.

Gráfico 2. Correlación entre las 20 variables más importantes según el criterio de impureza de Gini y las variables de Canon.



Variables más importantes según el criterio de SHAP Values

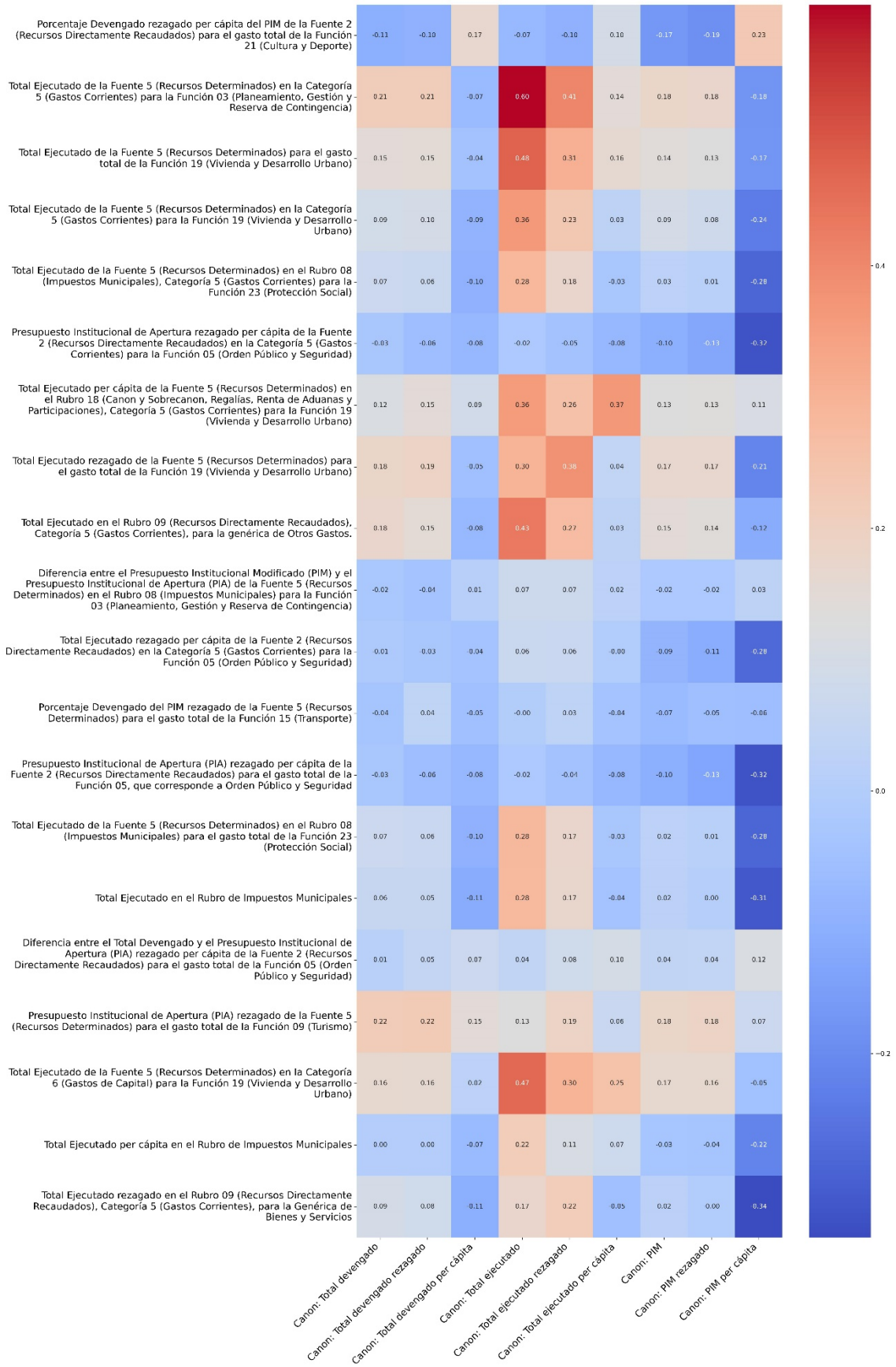
En esta sección se presentan las 20 variables más importantes según el criterio de SHAP Values para el modelo óptimo.

Tabla 8. Veinte variables más importantes de acuerdo con el criterio de SHAP Values.

Variable	Etiqueta	SHAP Values
_devppimtotfun_f2cydeppc	Porcentaje Devengado rezagado per cápita del PIM de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) para el gasto total de la Función 21 (Cultura y Deporte)	0.055
tejgfun_f5ct05pgrco	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 03 (Planeamiento, Gestión y Reserva de Contingencia)	0.016
tejgtotfun_f5viv	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.016
tejgfun_f5ct05viv	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.011
tejgfun_f5r08ct05prots	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en el Rubro 08 (Impuestos Municipales), Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 23 (Protección Social)	0.01
_piagfun_f2ct05opsegpc	Presupuesto Institucional de Apertura rezagado per cápita de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 05 (Orden Público y Seguridad)	0.01
tejgfun_f5r18ct05vivpc	Total Ejecutado per cápita de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en el Rubro 18 (Canon y Sobrecanon, Regalías, Renta de Aduanas y Participaciones), Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.008
_tejgtotfun_f5viv	Total Ejecutado rezagado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.008
tejgge_r09ct05otgst	Total Ejecutado en el Rubro 09 (Recursos Directamente Recaudados), Categoría 5 (Gastos Corrientes), para la genérica de Otros Gastos.	0.007
dfgpimpiatotfun_f5r08pgrco	Diferencia entre el Presupuesto Institucional Modificado (PIM) y el Presupuesto Institucional de Apertura (PIA) de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en el Rubro 08 (Impuestos Municipales) para la Función 03 (Planeamiento, Gestión y Reserva de Contingencia)	0.006
_tejgfun_f2ct05opsegpc	Total Ejecutado rezagado per cápita de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) en la Categoría 5 (Gastos Corrientes) para la Función 05 (Orden Público y Seguridad)	0.006
_devppimtotfun_f5trans	Porcentaje Devengado del PIM rezagado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 15 (Transporte)	0.005
_piagtotfun_f2opsegpc	Presupuesto Institucional de Apertura (PIA) rezagado per cápita de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) para el gasto total de la Función 05, que corresponde a Orden Público y Seguridad	0.004
tejgtotfun_f5r08prots	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en el Rubro 08 (Impuestos Municipales) para el gasto total de la Función 23 (Protección Social)	0.004
tejgrb_impm	Total Ejecutado en el Rubro de Impuestos Municipales	0.004
_dfgdevpiagtotfun_f2opsegpc	Diferencia entre el Total Devengado y el Presupuesto Institucional de Apertura (PIA) rezagado per cápita de la Fuente 2 (Recursos Directamente Recaudados) para el gasto total de la Función 05 (Orden Público y Seguridad)	0.003
_piagtotfun_f5turi	Presupuesto Institucional de Apertura (PIA) rezagado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) para el gasto total de la Función 09 (Turismo)	0.003
tejgfun_f5ct06viv	Total Ejecutado de la Fuente 5 (Recursos Determinados) en la Categoría 6 (Gastos de Capital) para la Función 19 (Vivienda y Desarrollo Urbano)	0.003
tejgrb_impmpc	Total Ejecutado per cápita en el Rubro de Impuestos Municipales	0.003
_tejgge_r09ct05biser	Total Ejecutado rezagado en el Rubro 09 (Recursos Directamente Recaudados), Categoría 5 (Gastos Corrientes), para la Genérica de Bienes y Servicios	0.003

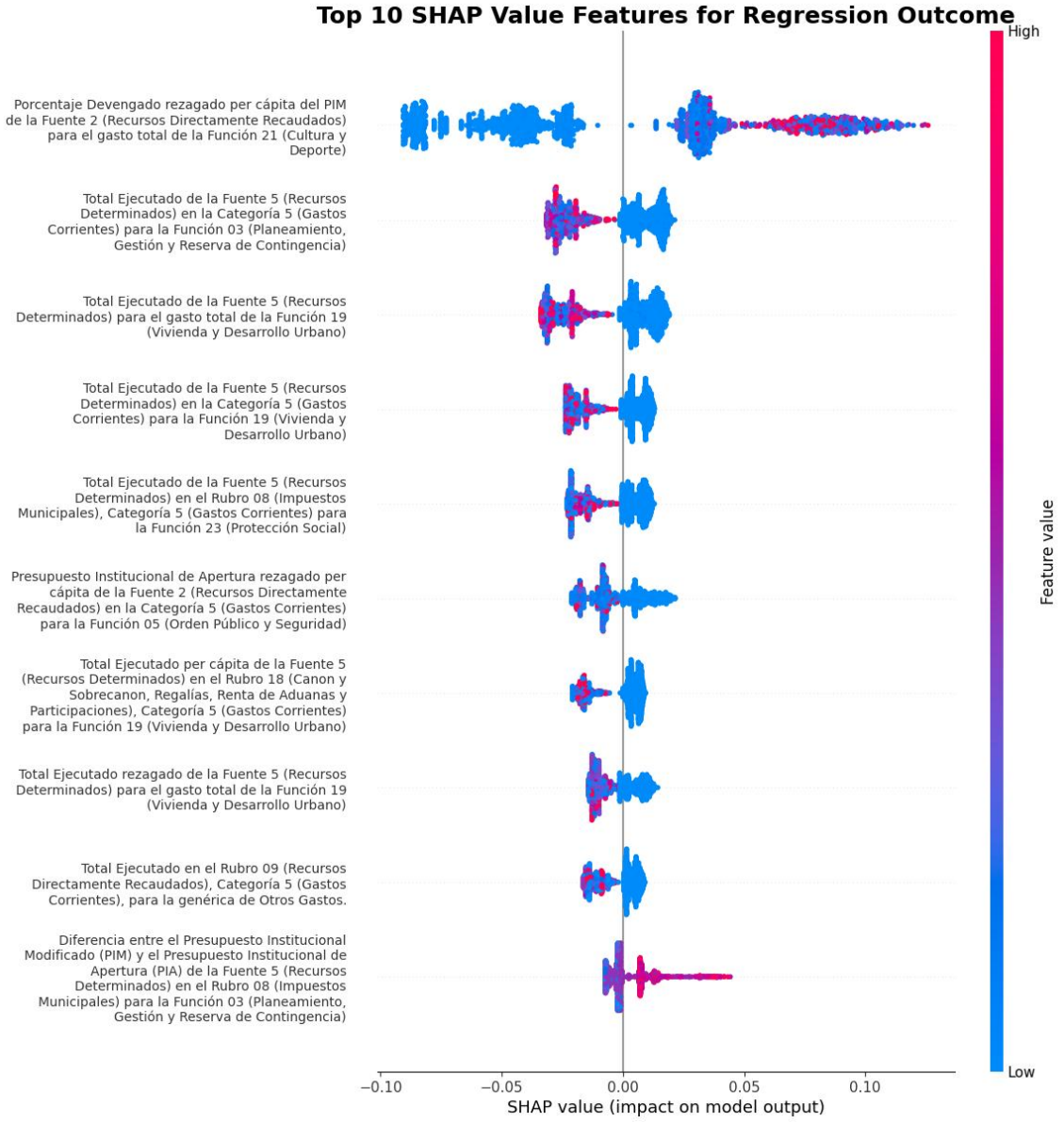
Asimismo, se visualiza la correlación entre las 20 variables más importantes según el criterio SHAP Values y las variables de Canon.

Gráfico 3. Correlación entre las 20 variables más importantes según el criterio de SHAP Values y las variables de Canon.



Adicionalmente se presenta un gráfico de SHAP Values que indica cómo cada una de las 10 variables más importantes influye en la predicción de casos de corrupción amplia para el modelo óptimo seleccionado. Cada punto representa una observación: los puntos rojos indican valores altos de la característica y los azules, valores bajos. La posición horizontal de los puntos refleja la magnitud de la influencia de la característica en la predicción. Las características están ordenadas de mayor a menor impacto en el eje vertical. Un punto hacia la derecha sugiere que la característica incrementa la probabilidad de corrupción amplia, mientras que un punto hacia la izquierda sugiere lo contrario. La concentración de puntos muestra la variabilidad de la influencia de la característica: una mayor dispersión indica mayor variabilidad en su impacto en las predicciones.

Gráfico 4. 10 variables más importantes según criterio SHAP para casos positivos de Corrupción Amplia



ANEXOS

Anexo 1. Combinación óptima de hiperparámetros para modelos Naive Random Oversampling en árboles

Modelo	n_estimators	max_depth	max_features
Regression Forest	1000	20	-
LGBM Classifier	500	2	-
Gradient Boosting Trees	500	2	20%
Random Forest	250	20	20%
Fuente: elaboración propia			

Anexo 2. Combinación óptima de hiperparámetros para modelos Naive Random Oversampling de regularización

Modelo	Cs (Fuerza de la regularización)
Lasso	100
Ridge	100
Elastic Net	100
Fuente: elaboración propia	

RESULTADOS CON UN STEPS DE 0.01 PARA EL MODELO REGRESSION FOREST

La siguiente tabla presenta los resultados óptimos cuando se consideran steps de 0.01 unidades para establecer el threshold en el modelo Regression. Se muestra que el modelo óptimo, según la métrica F1, es el modelo Regression Forest entrenado con el conjunto de entrenamiento SMOTE con un threshold de 0.45.

Tabla 98. Métricas de desempeño de los modelos entrenados con el conjunto de entrenamiento SMOTE

Métrica	**Regresión Logística**	**Lasso**	**Ridge**	**Elastic Net**	**Random Forest**	**Gradient Boosting Trees**	**LGBM Classifier**	**Regression Forest (threshold = 0.45)**
F1	0.506	0.541	0.541	0.541	0.551	0.522	0.523	0.662
Accuracy	0.833	0.780	0.78	0.78	0.896	0.906	0.908	0.879
AUC ROC	0.556	0.636	0.636	0.636	0.808	0.778	0.741	0.814
F1 (Sí)	0.908	0.872	0.872	0.872	0.945	0.950	0.952	0.933
F1 (No)	0.104	0.209	0.209	0.209	0.157	0.093	0.095	0.390
Fuente: elaboración propia								