

# **Fortalecimiento del SAT mediante Machine Learning en la detección de violencia atípica**

**Seminario de Tesis**

**Juan Diego Heredia Niño**

Facultad de Economía  
Universidad de los Andes

1 de octubre de 2025



# Contenido

## 1. Motivación

## 2. Hechos Estilizados

## 3. Pregunta de Investigación

## 4. Datos

## 5. Metodología

# Los Costos de la Violencia



- **Contexto en Latinoamérica:**

- Hasta **7.1% del PIB** cuando se incluyen efectos intangibles (Londoño & Guerrero, 1999).

# Los Costos de la Violencia



- **Contexto en Latinoamérica:**

- Hasta **7.1% del PIB** cuando se incluyen efectos intangibles (Londoño & Guerrero, 1999).

- **Contexto en Colombia:**

# Los Costos de la Violencia



- **Contexto en Latinoamérica:**

- Hasta **7.1 % del PIB** cuando se incluyen efectos intangibles (Londoño & Guerrero, 1999).

- **Contexto en Colombia:**

- Costos **directos** superan **3 % del PIB anual** (BID, 2017):
  - Gasto público en seguridad/justicia
  - Costo de victimización (homicidios)
  - Inversiones privadas en protección
  - Encarcelamiento

# Los Costos de la Violencia



- **Contexto en Latinoamérica:**

- Hasta **7.1 % del PIB** cuando se incluyen efectos intangibles (Londoño & Guerrero, 1999).

- **Contexto en Colombia:**

- Costos **directos** superan **3 % del PIB anual** (BID, 2017):
  - Gasto público en seguridad/justicia
  - Costo de victimización (homicidios)
  - Inversiones privadas en protección
  - Encarcelamiento
- Costos **indirectos**:
  - **Productividad**: Pérdidas laborales y costos operativos empresariales
  - **Capital humano**: Reducción en inversión educativa y salud
  - **Instituciones**: Deterioro de confianza ciudadana
  - **Inversión**: Menor atracción de IED y planes de expansión

# Impacto de la Violencia en el Bienestar



- **Erosión multidimensional del bienestar:**

# Impacto de la Violencia en el Bienestar



- **Erosión multidimensional del bienestar:**
  - **Finanzas públicas:**
    - Reducción de ingresos fiscales (salida de empresas + daño a infraestructura)
    - Círculo vicioso: inseguridad → estancamiento → menos bienes públicos



# Impacto de la Violencia en el Bienestar



- **Erosión multidimensional del bienestar:**
  - **Finanzas públicas:**
    - Reducción de ingresos fiscales (salida de empresas + daño a infraestructura)
    - Círculo vicioso: inseguridad → estancamiento → menos bienes públicos
  - **Capital humano:**
    - Correlación negativa entre criminalidad y resultados educativos
    - ↑ Brechas de desigualdad (↓ movilidad social )

# Impacto de la Violencia en el Bienestar



- **Erosión multidimensional del bienestar:**
  - **Finanzas públicas:**
    - Reducción de ingresos fiscales (salida de empresas + daño a infraestructura)
    - Círculo vicioso: inseguridad → estancamiento → menos bienes públicos
  - **Capital humano:**
    - Correlación negativa entre criminalidad y resultados educativos
    - ↑ Brechas de desigualdad (↓ movilidad social )
  - **Cohesión social:** Pérdida de confianza institucional + tejido social fracturado

# Impacto de la Violencia en el Bienestar



- **Erosión multidimensional del bienestar:**
  - **Finanzas públicas:**
    - Reducción de ingresos fiscales (salida de empresas + daño a infraestructura)
    - Círculo vicioso: inseguridad → estancamiento → menos bienes públicos
  - **Capital humano:**
    - Correlación negativa entre criminalidad y resultados educativos
    - ↑ Brechas de desigualdad (↓ movilidad social )
  - **Cohesión social:** Pérdida de confianza institucional + tejido social fracturado
- **Violencia atípica:**

# Impacto de la Violencia en el Bienestar



- **Erosión multidimensional del bienestar:**

- **Finanzas públicas:**

- Reducción de ingresos fiscales (salida de empresas + daño a infraestructura)
    - Círculo vicioso: inseguridad → estancamiento → menos bienes públicos

- **Capital humano:**

- Correlación negativa entre criminalidad y resultados educativos
    - ↑ Brechas de desigualdad (↓ movilidad social)

- **Cohesión social:** Pérdida de confianza institucional + tejido social fracturado

- **Violencia atípica:**

- Episodios **abruptos** e **intensos**

- Menor capacidad de respuesta institucional

- Consecuencias críticas:

- Desplazamiento forzado + Pérdida de vidas
    - Alteración organización socioeconómica/política
    - Trauma colectivo

# Sistema de Alertas Tempranas



- **¿Qué es el Sistema de Alertas Tempranas (SAT)?**
  - Creado por la Defensoría del Pueblo en 2001
  - Mecanismo institucional para **monitorear riesgos** del conflicto armado
  - Objetivo: Prevenir violaciones masivas de DDHH y proteger comunidades vulnerables

# Sistema de Alertas Tempranas



- **¿Qué es el Sistema de Alertas Tempranas (SAT)?**
  - Creado por la Defensoría del Pueblo en 2001
  - Mecanismo institucional para **monitorear riesgos** del conflicto armado
  - Objetivo: Prevenir violaciones masivas de DDHH y proteger comunidades vulnerables
- **¿Cómo opera?**
  - Metodología **cualitativa**:
    - Recopilación de testimonios, indicadores sociales y observación de campo
    - Verificación humana de fuentes locales
  - Productos clave:
    - Informes de Riesgo + Notas de Seguimiento
    - Coordinación con entidades estatales para acción preventiva

# Sistema de Alertas Tempranas



- **Logros y limitaciones:**

- **Cobertura nacional:** 22 departamentos monitoreados (urbano + rural)
- **Desafíos operativos:**
  - Escalabilidad limitada por métodos manuales
  - Detección tardía de señales no lineales (ej: violencia atípica)
  - Dependencia de articulación interinstitucional

# Sistema de Alertas Tempranas



- **Logros y limitaciones:**
  - **Cobertura nacional:** 22 departamentos monitoreados (urbano + rural)
  - **Desafíos operativos:**
    - Escalabilidad limitada por métodos manuales
    - Detección tardía de señales no lineales (ej: violencia atípica)
    - Dependencia de articulación interinstitucional
- **Complementar** metodologías cualitativas
  - Detección temprana de patrones en datos cuantitativos
  - Priorización automática de zonas críticas
  - Reducción de sesgos en interpretación humana



# ¿Cómo se puede complementar el SAT usando Machine Learning?



- **Violencia atípica: un desafío para métodos tradicionales**
  - Factores detonantes: **cambios abruptos** + variables no observables (ej: tensiones políticas locales)
  - Dificultad para detectar relaciones **no lineales** entre variables
  - **ML como solución**: Procesa múltiples fuentes + identifica patrones históricos complejos

# ¿Cómo se puede complementar el SAT usando Machine Learning?



- **Violencia atípica: un desafío para métodos tradicionales**
  - Factores detonantes: **cambios abruptos** + variables no observables (ej: tensiones políticas locales)
  - Dificultad para detectar relaciones **no lineales** entre variables
  - **ML como solución**: Procesa múltiples fuentes + identifica patrones históricos complejos
- **Lecciones de estudios recientes: Bazzi et al. (2022)**
  - Análisis en Colombia e Indonesia con modelos predictivos:
    - **Acierto**: Identificación precisa de hotspots de violencia crónica
    - **Falla**: Baja precisión en predicción de brotes nuevos
  - Implicación clave: Combinar **ML** con **análisis cualitativo** del SAT

# Determinantes de la Violencia en Colombia



- **¿Por qué estudiar los determinantes?**
  - Entender las causas subyacentes es clave para:
    - Diseñar modelos predictivos robustos (ej: ML + SAT)
    - Priorizar variables en análisis de riesgo
    - Evitar soluciones simplistas o descontextualizadas
- **Enfoque integrado: Levitt & Rubio (2000); Bourguignon et al. (2003)**
  - **Factores estructurales** (largo plazo):
    - Desigualdad, debilidad institucional, economías ilegales
  - **Incentivos económicos** (corto plazo):
    - Rentas ilícitas, control de recursos, alta impunidad

# Determinantes de la Violencia en Colombia



- **Factores estructurales críticos:**

- **Debilidad institucional:**

- Bonilla (2009): 75 % de homicidios no resueltos en zonas rurales

- **Desigualdad socioeconómica:**

- Bourguignon et al. (2003): +1% desempleo juvenil → +0.8% homicidios

- **Incentivos económicos y choques externos:**

- **Bonanzas de commodities:**

- Dube & Vargas (2013): +10% precio petróleo → +6.5% violencia

- **Narcotráfico:**

- Angrist & Kugler (2008): Regiones con coca tienen 3x más masacres

# Enfoque Analítico del Estudio



**Perspectiva de violencia:** Seguridad pública

# Enfoque Analítico del Estudio



## Perspectiva de violencia: Seguridad pública

- Incidencia de grupos armados y criminales:
  - Economías ilícitas
  - Control territorial
  - Confrontación armada

# Enfoque Analítico del Estudio



## Perspectiva de violencia: Seguridad pública

- Incidencia de **grupos armados** y **criminales**:
  - Economías ilícitas
  - Control territorial
  - Confrontación armada
- Impacto de la violencia:
  - Vida cotidiana de la población
  - Gobernanza local
  - Estabilidad institucional

# Presencia de Grupos Armados

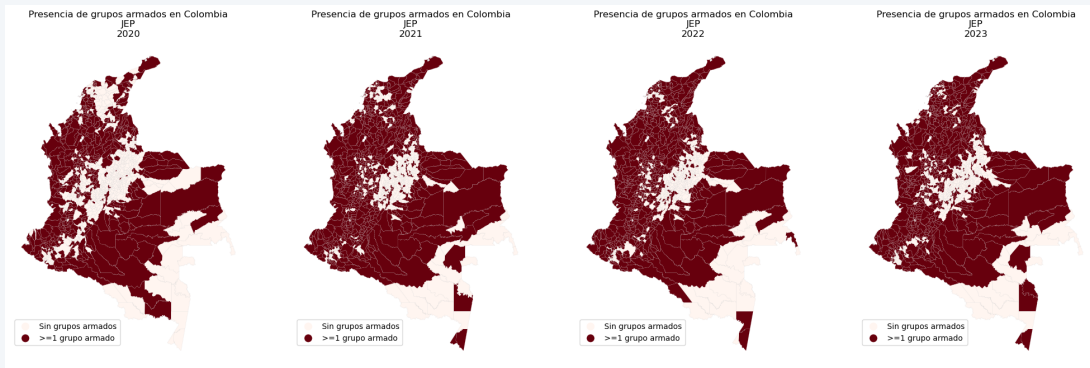


Figura: Expansión de grupos armados por municipios en Colombia, 2020-2023

*Fuente: Elaboración propia*



# Presencia de Grupos Criminales

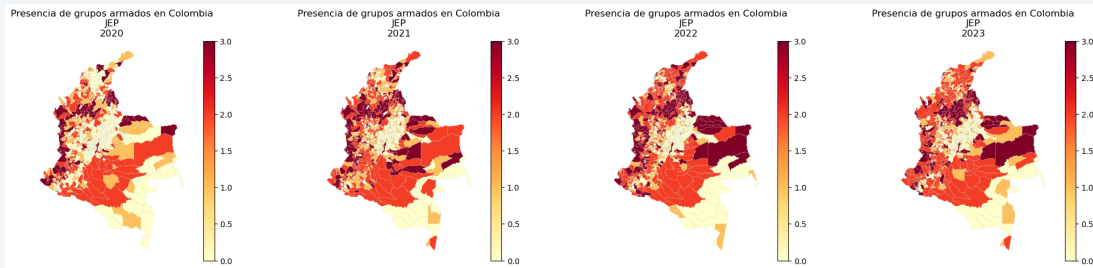


Figura: Cantidad de grupos armados por municipios en Colombia, 2020-2023

*Fuente: Elaboración propia*

# ¿Qué definimos por violencia?



# ¿Qué definimos por violencia?



## Índice de Violencia Agregada (IACV)

- Componentes (Municipal y trimestral por 100,000 hab.):
  - Homicidio, extorsión, secuestro, terrorismo, masacres
- Ponderación por gravedad legal (Código Penal):

Delito	Penal (años)	Peso (%)
Homicidio	19.0	17.04
Extorsión	11.5	10.31
Secuestro	16.0	14.35
Terrorismo	15.0	13.45
Masacres	50.0	44.84

- **Propósito:** Medida de seguridad pública agregada

# ¿Qué otros tipos de violencia definimos?



# ¿Qué otros tipos de violencia definimos?



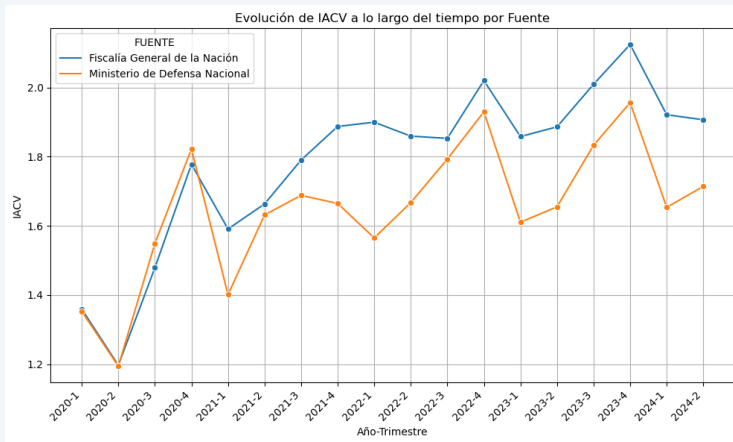
## Índice de Amedrentamiento (IA)

- Componentes (Municipal y trimestral por 100,000 hab.):
  - Amenazas
  - Tentativas de asesinato y atentados
  - Desplazamiento forzado
  - Hostigamiento
- **Propósito:** Medir clima de miedo

## Índice de Gobernanza Criminal (IGC)

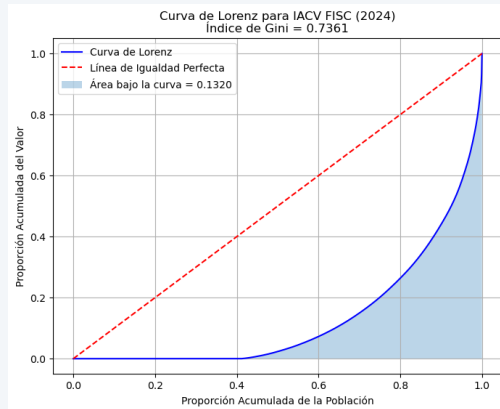
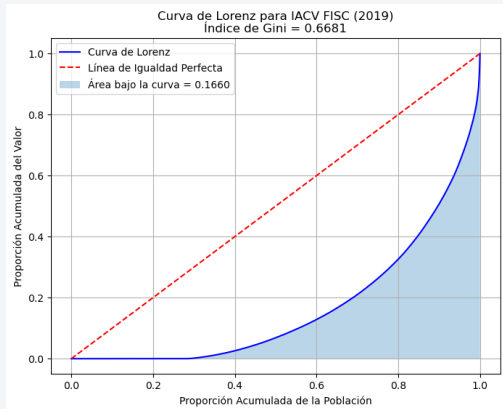
- Componentes (Municipal y trimestral por 100,000 hab.):
  - Confinamientos
  - Retenes ilegales
  - Paros armados
  - Extorsión
- **Propósito:** Medir control territorial

# Evolución de la Violencia en Colombia



*Fuente: Elaboración propia*

# Distribución de la violencia en Colombia

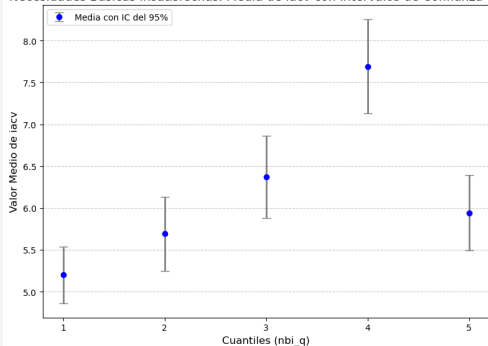


*Fuente: Elaboración propia*

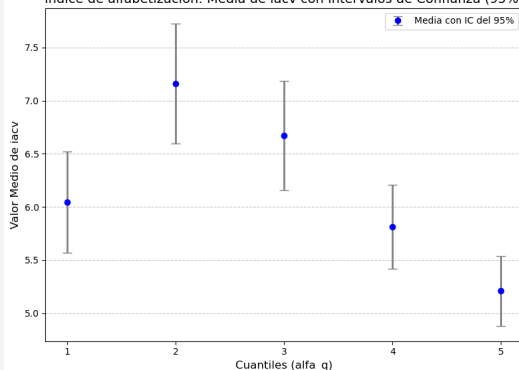
# Vulnerabilidad municipal a la violencia



Necesidades Básicas Insatisfechas: Media de iacv con Intervalos de Confianza (95%)



Índice de alfabetización: Media de iacv con Intervalos de Confianza (95%)



*Fuente: Elaboración propia*





# Pregunta de Investigación

---

¿El uso de Machine Learning para pronosticar **violencia atípica** mejorará la **precisión y sensibilidad** del pronóstico en comparación con las alertas tempranas de la Defensoría?

# ¿Qué entendemos por Violencia Atípica?



Criterio basado en **desviación estándar**: Bazzi et al.(2022):

## Definición

La **violencia atípica** se define como aquella que supera el umbral de **1 desviación estándar** del promedio de los últimos **3 años**.

# Problema de Clasificación Binaria



- **Decisión operativa:** Atípico (1) vs No atípico (0)
  - Más eficiente que predicción continua para el SAT
- **Ventajas clave:**
  - Manejo de desbalance:
    - Reponderación de clases
    - Sobremuestreo controlado
  - Optimización de umbrales: Ajuste para maximizar F1-Score

# Métricas



# Métricas



- **Precisión:**
  - "No mover recursos innecesariamente"
  - Minimiza la cantidad de veces que pronóstico violencia atípica y no ocurre
  - **Costo de fallar:** Desgaste institucional + gasto inútil



- **Precisión:**

- "No mover recursos innecesariamente"
- Minimiza la cantidad de veces que pronóstico violencia atípica y no ocurre
- **Costo de fallar:** Desgaste institucional + gasto inútil

- **Sensibilidad:**

- "No dejar pasar ningún evento crítico"
- Minimiza la cantidad de veces que no pronóstico violencia atípica y ocurre
- **Costo de fallar:** Pérdida de vidas + crisis humanitaria



- **Precisión:**

- "No mover recursos innecesariamente"
- Minimiza la cantidad de veces que pronóstico violencia atípica y no ocurre
- **Costo de fallar:** Desgaste institucional + gasto inútil

- **Sensibilidad:**

- "No dejar pasar ningún evento crítico"
- Minimiza la cantidad de veces que no pronóstico violencia atípica y ocurre
- **Costo de fallar:** Pérdida de vidas + crisis humanitaria

- **F1-Score:**

- Balance entre eficiencia y protección





- **Precisión:**

- "No mover recursos innecesariamente"
- Minimiza la cantidad de veces que pronóstico violencia atípica y no ocurre
- **Costo de fallar:** Desgaste institucional + gasto inútil

- **Sensibilidad:**

- "No dejar pasar ningún evento crítico"
- Minimiza la cantidad de veces que no pronóstico violencia atípica y ocurre
- **Costo de fallar:** Pérdida de vidas + crisis humanitaria

- **F1-Score:**

- Balance entre eficiencia y protección

## Precisión

$$P = \frac{VP}{VP + FP}$$

## Sensibilidad

$$S = \frac{VP}{VP + FN}$$

## F1-Score

$$F1 = 2 \times \frac{P \times S}{P + S}$$



# Datos

---

# Fuentes de Datos



Los datos de violencia provienen de tres fuentes principales:

- **Fiscalía General de la Nación:** Registros mensuales de homicidio, extorsión, secuestro, terrorismo y masacres a nivel municipal, mensual (2014-2024).
- **Ministerio de Defensa Nacional:** Serie histórica de los mismos delitos con mayor cobertura temporal a nivel municipal, mensual(1997-2024)
- **Jurisdicción Especial para la Paz (JEP):** Datos sobre presencia de grupos armados y eventos violentos (2017-2024), incluyendo desplazamientos, hostigamientos y paros armados.

# Fuentes de Datos



Para analizar la relación entre violencia y factores estructurales, se integran:

- **Panel Municipal del CEDE** (2005–2023): Información demográfica, socioeconómica e institucional, como **pobreza, acceso a servicios y programas para víctimas**.
- **Cultivos ilícitos de coca** (1999–2023, Observatorio de Drogas de Colombia): Financiación de grupos armados y la **dinámica del conflicto**.
- **Luminosidad nocturna (VIIRS Nighttime Light)** (2012–2023): Indicador proxy de **actividad económica local**.



# Metodología

---

# Modelo Teórico: Clasificación Binaria



- Aprendizaje Supervisado: Clasificación Binaria

$$y = f(X)$$

# Modelo Teórico: Clasificación Binaria



- **Aprendizaje Supervisado: Clasificación Binaria**

$$y = f(X)$$

- **Función de probabilidad:**

$$y_t = \begin{cases} 1 & \text{si } IACV_t \geq \bar{X} + \sigma \text{ (atípico)} \\ 0 & \text{si } IACV_t < \bar{X} + \sigma \text{ (normal)} \end{cases}$$



## Objetivo

Estimar  $P(y = 1|X)$  para activar alertas tempranas con  $\uparrow$  precisión y  $\uparrow$  sensibilidad





## Objetivo

Estimar  $P(y = 1|X)$  para activar alertas tempranas con  $\uparrow$  precisión y  $\uparrow$  sensibilidad

- **Variables explicativas**  $X$ :



## Objetivo

Estimar  $P(y = 1|X)$  para activar alertas tempranas con  $\uparrow$  precisión y  $\uparrow$  sensibilidad

- **Variables explicativas  $X$ :**
  - Factores estructurales:
    - Desigualdad, presencia estatal, economías ilegales, empleo, presencia grupos armados, educación, ubicación, etc.



## Objetivo

Estimar  $P(y = 1|X)$  para activar alertas tempranas con  $\uparrow$  precisión y  $\uparrow$  sensibilidad

- **Variables explicativas  $X$ :**
  - Factores estructurales:
    - Desigualdad, presencia estatal, economías ilegales, empleo, presencia grupos armados, educación, ubicación, etc.
  - Rezagos temporales de violencia:
    - IACV, IGC e IA

# Enfoques de Machine Learning: Elastic Net y Random Forest



## 1. Elastic Net

- **Qué hace:**
  - Regresión lineal con penalización combinada L1 (Lasso) y L2 (Ridge)
- **Ventaja:**
  - Selección automática de variables y reducción de sobreajuste

## 2. Random Forest

- **Qué hace:**
  - Ensamble de múltiples árboles de decisión
- **Ventaja:**
  - Maneja alta dimensionalidad y reduce el sobreajuste

# Enfoques de Machine Learning: XGBoost y LSTM



## 3. XGBoost

- **Qué hace:**
  - Boosting con  $n$  iteraciones + regularización
- **Ventaja:**
  - Similar a Random Forest
  - Eficiencia con datos desbalanceados
  - Tratamiento de valores nulos

## 4. Redes LSTM

- **Qué hace:**
  - Modela dinámicas temporales de forma más efectiva que métodos tradicionales
- **Ventaja:**
  - Detecta patrones temporales críticos

	<b>Logit</b>	<b>Lasso</b>	<b>Elastic Net</b>	<b>Random Forests</b>
% Acierto	0.720374	0.720309	0.720296	0.853565
Sensibilidad	0.743353	0.743425	0.743425	0.603754
Especificidad	0.707203	0.707058	0.707038	0.996758
AUC	0.811302	0.811277	0.811276	0.897908
Relación FP/TP	0.687167	0.687439	0.687488	0.009368
Relación FN/TP	0.345255	0.345125	0.345125	0.656304

**Cuadro:** Comparación de modelos: métricas de desempeño

**¡Gracias!**

# Referencias



- Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). *Los costos del crimen y la violencia*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0006383>
- Bazzi, S., Blair, R. A., Dube, O., Gudgeon, M., & Peck, R. (2022). *The promise and pitfalls of conflict prediction: Evidence from Colombia and Indonesia*. *The Review of Economics and Statistics*, 104(6), 1246–1262. [https://doi.org/10.1162/rest\\_a\\_01172](https://doi.org/10.1162/rest_a_01172)
- Bourguignon, F., Núñez, J., & Sánchez, F. (2003). *What part of the income distribution does inequality affect crime? The case of Colombia*. Documento CEDE, Universidad de los Andes.
- Dube, O., & Vargas, J. F. (2013). *Commodity price shocks and civil conflict: Evidence from Colombia*. *Review of Economic Studies*, 80(4), 1384–1421. <https://doi.org/10.1093/restud/rdt009>
- Feldmann, A., & Hinojosa, V. (2009). *Terrorism in Colombia: Logic and sources of a multidimensional and ubiquitous phenomenon*. *Terrorism and Political Violence*, 21(1), 42–61. <https://doi.org/10.1080/09546550802544694>
- Levitt, S., & Rubio, M. (2000). *Understanding crime in Colombia and what can be done about it*. Documento de trabajo, Universidad de Chicago/Fedesarrollo.
- Londoño, J. L., & Guerrero, R. (1999). *Violencia en América Latina: Epidemiología y costos*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Mejía, D., & Restrepo, P. (2011). *The economics of the war on illegal drug production and trafficking*. Documento CEDE, Universidad de los Andes.
- Rubio, M. (2003). *El rapto de la pesca milagrosa: Breve historia del secuestro en Colombia*. Documentos CEDE No. 2003–36, Universidad de los Andes.
- Sánchez, F., & Chacón, M. (2005). *Conflicto, Estado y descentralización: Disputa armada por el control local, 1974–2002*. Documento CIDER/Universidad de los Andes – LSE.