

Cuaderno reproducible

Análisis de Sismicidad de Colombia

Subdirección para el Conocimiento del Riesgo

UNGRD

Este cuaderno demuestra cómo analizar el **catálogo sísmico de Colombia** usando datos públicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a través de su API FDSN, sin necesidad de registro ni clave de acceso.

Es un cuaderno de ejemplo para la [Convocatoria de Cuadernos Reproducibles UNGRD](#), que ilustra las capacidades técnicas de la plataforma y el estilo esperado para los cuadernos participantes.

¿QUÉ APRENDERÁS?

- Descargar catálogos sísmicos desde la API pública del USGS
- Analizar la distribución temporal de la sismicidad
- Calcular la relación de **Gutenberg-Richter** para estimar la *b-value*
- Explorar la distribución de profundidades focales
- Crear un **mapa interactivo** de epicentros con Folium

CONTEXTO CIENTÍFICO

Colombia se encuentra en la zona de convergencia de las **placas tectónicas de Nazca, Caribe y Sudamérica**, lo que la convierte en uno de los países con mayor actividad sísmica de América Latina. Esta condición explica la frecuencia y diversidad de sismos: desde eventos someros en la corteza continental hasta sismos profundos de subducción.

La caracterización estadística de la sismicidad —su tasa de ocurrencia, distribución de magnitudes y profundidades— es un insumo fundamental para el **Análisis Probabilista de Amenaza Sísmica (PSHA)**, que sustenta la norma sismoresistente colombiana (NSR-10) y los estudios de microzonificación.

1. INSTALACIÓN DE DEPENDENCIAS

Este cuaderno utiliza únicamente bibliotecas estándar del ecosistema científico Python. Para instalarlas en tu entorno local:

```
import sys

# — Detección automática del entorno de ejecución —————
_ES_JUPYTERLITE = 'pyodide' in sys.modules
_ES_COLAB       = 'google.colab' in sys.modules

if _ES_JUPYTERLITE:
    import micropip
    await micropip.install(['pyodide-http', 'folium', 'scipy', 'seaborn'])
    import pyodide_http
    pyodide_http.patch_all()
    print('✅ Entorno: JupyterLite (navegador)')
else:
    import subprocess
    paquetes = [
        'pandas<3.0.0', # <3.0.0 por compatibilidad con bqplot y otros paquetes del entorno
        'numpy',
        'matplotlib',
        'seaborn',
        'folium',
        'requests',
        'scipy',
    ]
    print('📦 Verificando e instalando dependencias...')
    subprocess.run(
        [sys.executable, '-m', 'pip', 'install', '-q'] + paquetes,
```

```

        check=True
    )
    entorno = 'Google Colab' if _ES_COLAB else 'local / Binder'
    print(f'✅ Entorno: {entorno}')

```

📦 Verificando e instalando dependencias...

✅ Entorno: local / Binder

```

import requests
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import seaborn as sns
import folium
from folium.plugins import MarkerCluster, HeatMap
from scipy import stats
from datetime import datetime
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

```

Configuración de estilos

```

plt.rcParams.update({
    'figure.dpi': 120,
    'font.family': 'sans-serif',
    'axes.spines.top': False,
    'axes.spines.right': False,
})
UNGRD_BLUE = '#0154a5'
UNGRD_ACCENT = '#2563eb'

```

print(f'✅ Dependencias cargadas correctamente')

✅ Dependencias cargadas correctamente

2. DESCARGA DEL CATÁLOGO SÍSMICO DESDE LA API DEL USGS

Usamos la **FDSN Event Web Service** del USGS, que no requiere autenticación. El bounding box cubre el territorio colombiano incluyendo el área de influencia de las principales zonas de subducción.

Parámetros de consulta – puedes modificar estos valores

```

PARAMS = {
    'format': 'csv',
    'starttime': '2000-01-01',
    'endtime': '2024-12-31',
    'minlatitude': -5.0, # sur de Colombia
    'maxlatitude': 13.0, # norte (incluye Caribe)
    'minlongitude': -82.0, # oeste (Pacífico)
    'maxlongitude': -65.0, # este (Orinoquía)
    'minmagnitude': 3.0,
    'orderby': 'time',
}

```

API_URL = 'https://earthquake.usgs.gov/fdsnws/event/1/query'

```

print('🌐 Descargando catálogo sísmico del USGS...')
print(f"    Período: {PARAMS['starttime']} → {PARAMS['endtime']}")
print(f"    Área: Colombia y área de influencia")
print(f"    Magnitud mínima: M ≥ {PARAMS['minmagnitude']}")

```

```

response = requests.get(API_URL, params=PARAMS, timeout=120)
response.raise_for_status()

```

```

from io import StringIO
df_raw = pd.read_csv(StringIO(response.text))
print(f"\n✅ Descarga completa: {len(df_raw):,} eventos sísmicos")

```

🌐 Descargando catálogo sísmico del USGS...
Período: 2000-01-01 → 2024-12-31
Área: Colombia y área de influencia
Magnitud mínima: $M \geq 3.0$

✅ Descarga completa: 4,201 eventos sísmicos

3. LIMPIEZA Y PREPARACIÓN DE LOS DATOS

```
# Seleccionar y renombrar columnas relevantes
df = df_raw[['time', 'latitude', 'longitude', 'depth', 'mag', 'magType', 'place']].copy()
df.columns = ['tiempo', 'latitud', 'longitud', 'profundidad_km', 'magnitud', 'tipo_mag', 'lugar']

# Convertir tiempo a datetime
df['tiempo'] = pd.to_datetime(df['tiempo'], utc=True)
df['año'] = df['tiempo'].dt.year
df['mes'] = df['tiempo'].dt.month

# Eliminar registros sin magnitud o profundidad
df = df.dropna(subset=['magnitud', 'profundidad_km', 'latitud', 'longitud'])

# Clasificación de profundidad focal
def clasificar_profundidad(d):
    if d <= 70: return 'Superficial (≤ 70 km)'
    elif d <= 300: return 'Intermedia (70–300 km)'
    else: return 'Profunda (> 300 km)'

df['clase_profundidad'] = df['profundidad_km'].apply(clasificar_profundidad)

print(f"Registros válidos: {len(df):,}")
print(f"\nEstadísticas descriptivas:")
df[['magnitud', 'profundidad_km']].describe().round(2)
```

Registros válidos: 4,201

Estadísticas descriptivas:

	magnitud	profundidad_km
count	4201.00	4201.00
mean	4.42	81.09
std	0.46	64.43
min	3.00	0.00
25%	4.20	20.38
50%	4.40	55.60
75%	4.60	152.41
max	7.80	436.50

```
# Distribución por clase de profundidad
conteo_prof = df['clase_profundidad'].value_counts()
print('Distribución por tipo de sismo:')
for clase, n in conteo_prof.items():
    print(f' {clase}: {n:,} ({n/len(df)*100:.1f}%)')
```

Distribución por tipo de sismo:
Superficial (≤ 70 km): 2,290 (54.5%)
Intermedia (70–300 km): 1,910 (45.5%)
Profunda (> 300 km): 1 (0.0%)

4. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA SISMICIDAD

Analizamos la evolución anual de la actividad sísmica para identificar periodos de mayor ocurrencia y tendencias a largo plazo.

```
fig, axes = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8))

# --- Panel superior: sismos por año ---
sismos_anuales = df.groupby('año').size().reset_index(name='conteo')
axes[0].bar(sismos_anuales['año'], sismos_anuales['conteo'],
            color=UNGRD_BLUE, alpha=0.85, edgecolor='white', linewidth=0.5)
axes[0].axhline(sismos_anuales['conteo'].mean(), color='tomato',
               linestyle='--', linewidth=1.5, label=f"Media anual: {sismos_anuales['conteo'].mean():.0f}")
axes[0].set_title('Sismicidad anual en Colombia (M ≥ 3.0)', fontsize=13, fontweight='bold', pad=10)
axes[0].set_ylabel('Número de eventos', fontsize=11)
axes[0].legend(fontsize=10)
axes[0].set_xlim(1999.5, 2024.5)

# --- Panel inferior: magnitud máxima por año ---
mag_anual = df.groupby('año')['magnitud'].max().reset_index()
sc = axes[1].scatter(mag_anual['año'], mag_anual['magnitud'],
                    s=mag_anual['magnitud']**2.5 * 3, c=mag_anual['magnitud'],
                    cmap='YlOrRd', alpha=0.85, edgecolors=UNGRD_BLUE, linewidths=0.5)
plt.colorbar(sc, ax=axes[1], label='Magnitud máxima')
axes[1].set_title('Magnitud máxima registrada por año', fontsize=13, fontweight='bold', pad=10)
axes[1].set_ylabel('Magnitud (Mw)', fontsize=11)
axes[1].set_xlabel('Año', fontsize=11)
axes[1].set_xlim(1999.5, 2024.5)

plt.tight_layout()
plt.savefig('sismicidad_temporal.png', bbox_inches='tight', dpi=150)
plt.show()
print('Figura guardada: sismicidad_temporal.png')
```

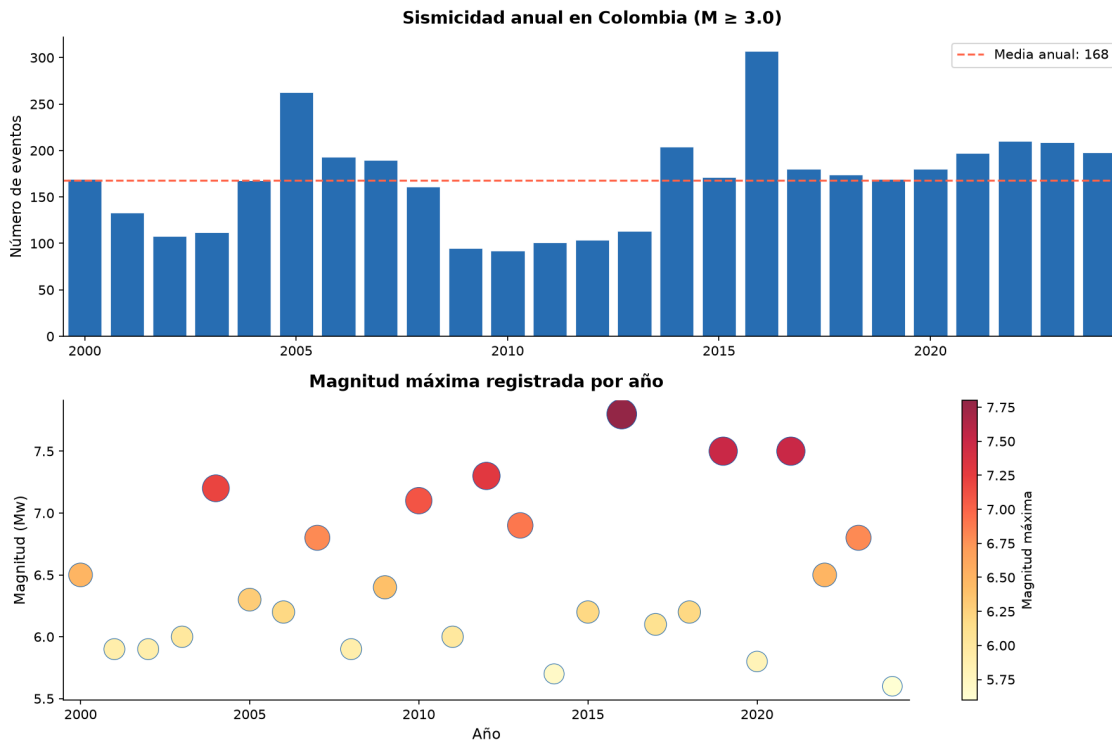


Figure 1: Distribución temporal de la sismicidad en Colombia ($M \geq 3.0$), 2000–2024. Panel superior: número de eventos anuales con la media del período (línea roja). Panel inferior: magnitud máxima registrada por año.

5. RELACIÓN DE GUTENBERG-RICHTER

La relación de **Gutenberg-Richter** ($\log_{10} N = a - b \cdot M$) describe la distribución de magnitudes de una región sísmica. El parámetro b (típicamente cercano a 1.0) indica la proporción entre sismos pequeños y grandes: una b -value más alta significa más sismos pequeños por cada grande.

Es uno de los indicadores fundamentales en el Análisis Probabilista de Amenaza Sísmica (PSHA).

```
def calcular_gutenberg_richter(magnitudes, m_min=3.0, bin_size=0.1):
    """Calcula la curva Gutenberg-Richter y estima la b-value por mínimos cuadrados."""
    bins = np.arange(m_min, magnitudes.max() + bin_size, bin_size)
    counts, edges = np.histogram(magnitudes, bins=bins)
    cum_counts = np.cumsum(counts[::-1])[::-1] # frecuencia acumulada
    mag_centers = (edges[:-1] + edges[1:]) / 2

    # Solo usar bins con al menos 1 evento
    mask = cum_counts > 0
    log_n = np.log10(cum_counts[mask])
    mags = mag_centers[mask]

    # Regresión lineal para estimar a y b
    slope, intercept, r, p, se = stats.linregress(mags, log_n)
    b_value = -slope
    a_value = intercept

    return mags, log_n, a_value, b_value, r**2

mags_gr, log_n_gr, a, b, r2 = calcular_gutenberg_richter(df['magnitud'])

fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(13, 5))

# --- Gráfico G-R ---
axes[0].scatter(mags_gr, log_n_gr, color=UNGRD_BLUE, s=25, alpha=0.8,
                label='Datos observados', zorder=3)
m_fit = np.linspace(mags_gr.min(), mags_gr.max(), 100)
axes[0].plot(m_fit, a - b * m_fit, color='tomato', linewidth=2,
             label=f'Ajuste G-R: b = {b:.2f} (R² = {r2:.3f})')
axes[0].set_xlabel('Magnitud (M)', fontsize=11)
axes[0].set_ylabel('log10 N (frecuencia acumulada)', fontsize=11)
axes[0].set_title('Relación de Gutenberg-Richter\nColombia 2000-2024', fontsize=12, fontweight='bold')
axes[0].legend(fontsize=10)
axes[0].grid(True, alpha=0.3)

# --- Histograma de magnitudes ---
axes[1].hist(df['magnitud'], bins=np.arange(3.0, df['magnitud'].max() + 0.2, 0.2),
             color=UNGRD_BLUE, alpha=0.85, edgecolor='white', linewidth=0.4)
axes[1].axvline(df['magnitud'].median(), color='tomato', linestyle='--',
               linewidth=1.5, label=f'Mediana: M {df['magnitud'].median():.1f}')
axes[1].set_xlabel('Magnitud (M)', fontsize=11)
axes[1].set_ylabel('Frecuencia', fontsize=11)
axes[1].set_title('Distribución de Magnitudes', fontsize=12, fontweight='bold')
axes[1].legend(fontsize=10)

plt.tight_layout()
plt.savefig('gutenberg_richter.png', bbox_inches='tight', dpi=150)
plt.show()

print(f'📊 Parámetros Gutenberg-Richter para Colombia:')
print(f'   b-value: {b:.3f} (valor global típico ≈ 1.0)')
print(f'   a-value: {a:.3f}')
print(f'   R²:      {r2:.3f}')
```

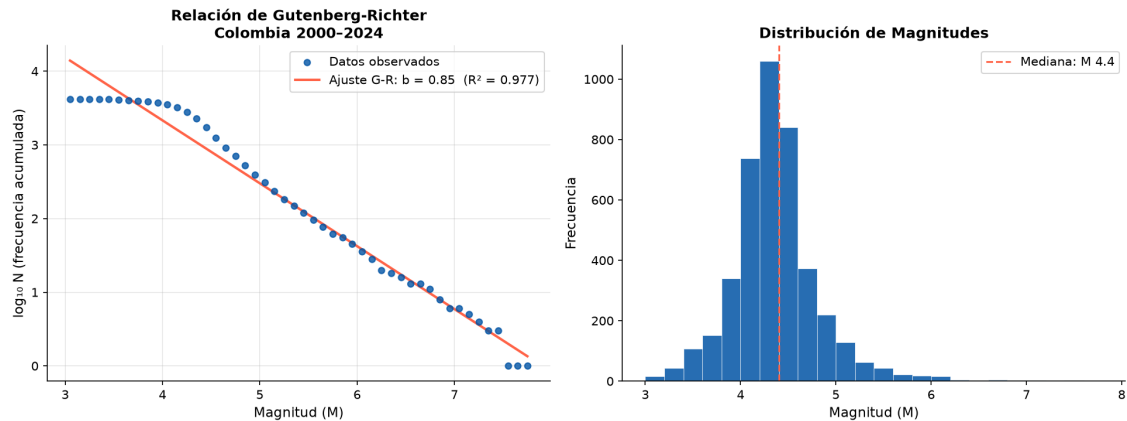


Figure 2: Relación de Gutenberg-Richter para Colombia 2000–2024. Izquierda: frecuencia acumulada vs. magnitud con ajuste lineal y b-value estimada. Derecha: histograma de magnitudes del catálogo.

6. ANÁLISIS DE PROFUNDIDAD FOCAL

La profundidad focal de un sismo determina en buena medida su radio de afectación y el tipo de daños que puede generar. Colombia presenta una distribución de profundidades amplia y variada, reflejo de los distintos regímenes tectónicos que confluyen en el territorio.

```
COLORES_PROF = {
    'Superficial ( $\leq 70$  km)': '#e74c3c',
    'Intermedia (70–300 km)': '#f39c12',
    'Profunda ( $> 300$  km)': '#2980b9',
}

fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(13, 5))

# --- Histograma de profundidades ---
for clase, color in COLORES_PROF.items():
    subset = df[df['clase_profundidad'] == clase]
    axes[0].hist(subset['profundidad_km'], bins=50, alpha=0.7, color=color,
                 label=f'{clase} (n={len(subset):,})', edgecolor='none')
axes[0].set_xlabel('Profundidad focal (km)', fontsize=11)
axes[0].set_ylabel('Frecuencia', fontsize=11)
axes[0].set_title('Distribución de Profundidades Focales', fontsize=12, fontweight='bold')
axes[0].legend(fontsize=9)

# --- Magnitud vs. Profundidad ---
for clase, color in COLORES_PROF.items():
    subset = df[df['clase_profundidad'] == clase]
    axes[1].scatter(subset['profundidad_km'], subset['magnitud'],
                   alpha=0.15, s=8, color=color, label=clase)
axes[1].set_xlabel('Profundidad focal (km)', fontsize=11)
axes[1].set_ylabel('Magnitud (M)', fontsize=11)
axes[1].set_title('Relación Profundidad–Magnitud', fontsize=12, fontweight='bold')
axes[1].legend(fontsize=9, markerscale=3)

plt.tight_layout()
plt.savefig('profundidad_focal.png', bbox_inches='tight', dpi=150)
plt.show()
```

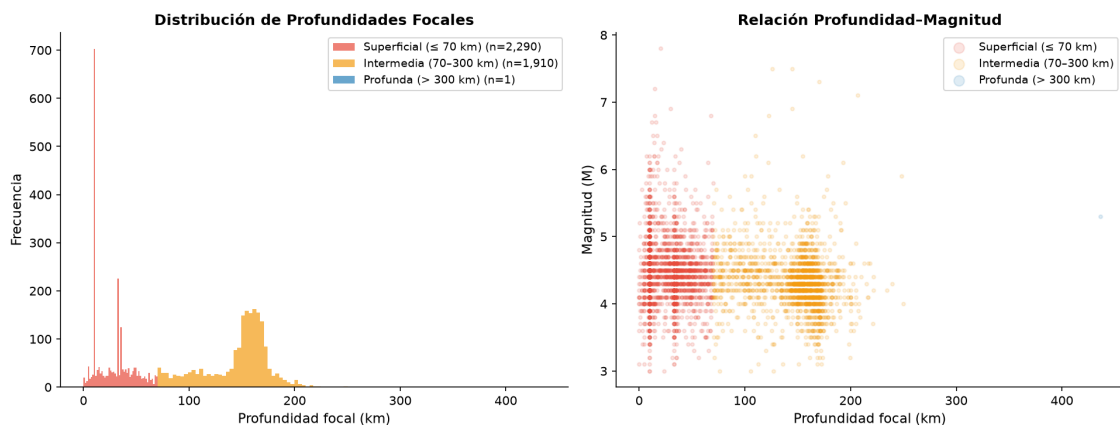


Figure 3: Distribución de profundidades focales en Colombia 2000–2024. Izquierda: histograma por clase de profundidad (superficial, intermedia, profunda). Derecha: relación profundidad–magnitud por clase.

7. SISMOS MÁS SIGNIFICATIVOS

Identificamos los eventos de mayor magnitud del período analizado y los contextualizamos dentro del marco tectónico de Colombia.

```
# Top 15 eventos por magnitud
top_sismos = df.nlargest(15, 'magnitud')[['tiempo', 'magnitud', 'profundidad_km',
                                           'clase_profundidad', 'latitud', 'longitud', 'lugar']]
top_sismos['tiempo'] = top_sismos['tiempo'].dt.strftime('%Y-%m-%d %H:%M UTC')
top_sismos = top_sismos.reset_index(drop=True)
top_sismos.index += 1
top_sismos.columns = ['Fecha/Hora', 'Magnitud', 'Prof. (km)', 'Clase', 'Lat', 'Lon', 'Lugar']
top_sismos
```

	Fecha/Hora	Magnitud	Prof. (km)	Clase	Lat	Lon	Lugar
1	2016-04-16 23:58 UTC	7.8	20.59	Superficial (≤ 70 km)	0.3819	-79.9218	27 km SSE of Muisne, Ecuador
2	2021-11-28 10:52 UTC	7.5	126.00	Intermedia (70–300 km)	-4.4667	-76.8126	43 km NNW of Barranca, Peru
3	2019-02-22 10:17 UTC	7.5	145.00	Intermedia (70–300 km)	-2.1862	-77.0505	115 km ESE of Palora, Ecuador
4	2012-09-30 16:31 UTC	7.3	170.00	Intermedia (70–300 km)	1.9290	-76.3620	11 km WNW of San Agustín, Colombia
5	2004-11-15 09:06 UTC	7.2	15.00	Superficial (≤ 70 km)	4.6950	-77.5080	32 km SSW of Pizarro, Colombia
6	2010-08-12 11:54 UTC	7.1	206.70	Intermedia (70–300 km)	-1.2660	-77.3060	Ecuador
7	2016-05-18 16:46 UTC	6.9	29.95	Superficial (≤ 70 km)	0.4947	-79.6160	24 km NW of Rosa Zarate, Ecuador
8	2013-02-09 14:16 UTC	6.9	145.00	Intermedia (70–300 km)	1.1350	-77.3930	2 km NNE of Yacuanquer, Colombia
9	2023-03-18 17:12 UTC	6.8	68.00	Superficial (≤ 70 km)	-2.7834	-79.8518	14 km NNW of Baláo, Ecuador
10	2007-11-16 03:13 UTC	6.8	122.90	Intermedia (70–300 km)	-2.3120	-77.8380	30 km E of Macas, Ecuador

	Fecha/Hora		Magnitud	Prof. (km)	Clase	Lat	Lon	Lugar
11	2007-09-10	01:49 UTC	6.8	15.00	Superficial (≤ 70 km)	2.9660	-77.9630	39 km WNW of Timbiquí, Colombia
12	2016-05-18	07:57 UTC	6.7	16.00	Superficial (≤ 70 km)	0.4261	-79.7899	32 km SE of Muisne, Ecuador
13	2013-08-13	15:43 UTC	6.7	12.00	Superficial (≤ 70 km)	5.7732	-78.1999	101 km WSW of Bahía Solano, Colombia
14	2023-05-25	03:05 UTC	6.5	13.00	Superficial (≤ 70 km)	8.9223	-77.0904	45 km NE of Puerto Obaldía, Panama
15	2022-02-03	15:58 UTC	6.5	110.00	Intermedia (70–300 km)	-4.4661	-76.9283	49 km NW of Barranca, Peru

8. MAPA INTERACTIVO DE EPICENTROS

El siguiente mapa muestra la distribución espacial de los epicentros. El tamaño de cada círculo es proporcional a la magnitud y el color indica la profundidad focal.

```
def color_por_profundidad(profundidad):
    if profundidad <= 70: return '#e74c3c' # rojo - superficial
    elif profundidad <= 300: return '#f39c12' # naranja - intermedia
    else: return '#2980b9' # azul - profunda

# Centrar mapa en Colombia
mapa = folium.Map(
    location=[4.5, -74.0],
    zoom_start=5,
    tiles='CartoDB positron'
)

# Usar solo M >= 4.0 para no sobrecargar el mapa
df_mapa = df[df['magnitud'] >= 4.0].copy()

# Capa de calor (heatmap) de todos los eventos M >= 3.0
heat_data = df[['latitud', 'longitud', 'magnitud']].values.tolist()
HeatMap(heat_data, name='Densidad sísmica (M ≥ 3.0)',
        radius=6, blur=8, max_zoom=8).add_to(mapa)

# Capa de marcadores para M >= 4.0
cluster = MarkerCluster(name='Epicentros M ≥ 4.0')
for _, row in df_mapa.iterrows():
    radio = max(3, row['magnitud'] ** 2.2 * 0.5)
    popup_txt = (
        f"<b>Magnitud:</b> M {row['magnitud']:.1f}<br>"
        f"<b>Profundidad:</b> {row['profundidad_km']:.0f} km ({row['clase_profundidad']})<br>"
        f"<b>Fecha:</b> {str(row['tiempo'][:10])}<br>"
        f"<b>Lugar:</b> {row['lugar']}"
    )
    folium.CircleMarker(
        location=[row['latitud'], row['longitud']],
        radius=radio,
        color=color_por_profundidad(row['profundidad_km']),
        fill=True, fill_opacity=0.65, weight=0.5,
        popup=folium.Popup(popup_txt, max_width=280),
        tooltip=f"M {row['magnitud']:.1f}"
    ).add_to(cluster)

cluster.add_to(mapa)

# Leyenda
```

```

leyenda_html = """
<div style="position:fixed; bottom:30px; left:30px; z-index:1000;
    background:white; padding:12px 16px; border-radius:8px;
    box-shadow:0 2px 8px rgba(0,0,0,0.2); font-size:12px; font-family:sans-serif;">
    <b>Profundidad focal</b><br>
    <span style='color:#e74c3c;'>●</span> Superficial ≤ 70 km<br>
    <span style='color:#f39c12;'>●</span> Intermedia 70–300 km<br>
    <span style='color:#2980b9;'>●</span> Profunda > 300 km<br>
    <hr style='margin:6px 0; border-color:#eee;'>
    <small>Tamaño ∝ Magnitud ∙ Catálogo USGS 2000–2024</small>
</div>
"""
mapa.get_root().html.add_child(folium.Element(leyenda_html))
folium.LayerControl().add_to(mapa)

# Guardar y mostrar
mapa.save('mapa_sismicidad_colombia.html')
print(f'✅ Mapa generado con {len(df_mapa):,} epicentros (M ≥ 4.0)')
print(' Abre mapa_sismicidad_colombia.html para visualización interactiva')
mapa

✅ Mapa generado con 3,765 epicentros (M ≥ 4.0)
Abre mapa_sismicidad_colombia.html para visualización interactiva

```

Make this Notebook Trusted to load map: File -> Trust Notebook

9. ANIMACIÓN TEMPORAL DE LA SISMICIDAD

El siguiente mapa anima la sismicidad de Colombia mes a mes durante el período 2000–2024. Cada círculo representa un evento $M \geq 4.0$; su tamaño es proporcional a la magnitud y el color indica la profundidad focal. Usa el control deslizante o el botón ▶ para reproducir la secuencia.

```

from folium.plugins import TimestampedGeoJson

# Filtrar eventos M >= 4.0 para reducir el volumen de la animación
df_anim = df[df['magnitud'] >= 4.0].copy()
df_anim = df_anim.sort_values('tiempo').reset_index(drop=True)

# Construir features GeoJSON con timestamps individuales
features = []
for _, row in df_anim.iterrows():
    mag = row['magnitud']
    prof = row['profundidad_km']
    color = color_por_profundidad(prof)
    feature = {
        'type': 'Feature',
        'geometry': {
            'type': 'Point',
            'coordinates': [row['longitud'], row['latitud']]
        },
        'properties': {
            'time': row['tiempo'].strftime('%Y-%m-%dT%H:%M:%S'),
            'popup': (
                f"<b>M {mag:.1f}</b><br>"
                f"Profundidad: {prof:.0f} km ({row['clase_profundidad']})<br>"
                f"Fecha: {str(row['tiempo'][:10])}<br>"
                f"{row['lugar']}"
            ),
            'style': {'weight': 0},
            'icon': 'circle',
            'iconstyle': {
                'fillColor': color,
                'fillOpacity': 0.75,
                'stroke': True,
                'color': '#222',
                'weight': 0.4,
            }
        }
    }
    features.append(feature)

```

```

        'radius': max(4, mag ** 2.2 * 0.55)
    }
}
}
features.append(feature)

# Mapa base con fondo oscuro para mejor contraste
mapa_anim = folium.Map(
    location=[4.5, -74.0],
    zoom_start=5,
    tiles='CartoDB dark_matter'
)

# Capa animada temporal – período mensual, ventana de 3 meses visible
TimestampedGeoJson(
    {'type': 'FeatureCollection', 'features': features},
    period='P1M',
    duration='P3M',
    transition_time=400,
    loop=False,
    auto_play=False,
    add_last_point=True,
    date_options='YYYY-MM-DD'
).add_to(mapa_anim)

# Leyenda
leyenda_anim = """
<div style='position:fixed; bottom:30px; left:30px; z-index:1000;
    background:rgba(20,20,20,0.85); color:#eee; padding:12px 16px;
    border-radius:8px; box-shadow:0 2px 8px rgba(0,0,0,0.5);
    font-size:12px; font-family:sans-serif;'>
    <b>Profundidad focal</b><br>
    <span style='color:#e74c3c;'>●</span> Superficial ≤ 70 km<br>
    <span style='color:#f39c12;'>●</span> Intermedia 70–300 km<br>
    <span style='color:#2980b9;'>●</span> Profunda > 300 km<br>
    <hr style='margin:6px 0; border-color:#555;'>
    <small>Tamaño × Magnitud · M ≥ 4.0 · 2000–2024</small>
</div>
"""
mapa_anim.get_root().html.add_child(folium.Element(leyenda_anim))

mapa_anim.save('mapa_animado_sismicidad.html')
print(f'✅ Animación generada: {len(df_anim):,} eventos M ≥ 4.0 · {len(features)} frames mensuales')
mapa_anim

```

✅ Animación generada: 3,765 eventos M ≥ 4.0 · 3765 frames mensuales

Make this Notebook Trusted to load map: File -> Trust Notebook

10. VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA SISMICIDAD

Aunque la sismicidad tectónica no debería mostrar marcada variación estacional, esta análisis permite identificar si existen periodos de mayor registro o si factores como la lluvia (relacionada con carga cortical o sismicidad inducida) tienen influencia.

```

meses_nombres = ['Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun',
                  'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dic']

fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(13, 4))

# --- Sismos por mes (todos los años) ---
por_mes = df.groupby('mes').size().reset_index(name='conteo')
axes[0].bar(por_mes['mes'], por_mes['conteo'],
            color=[plt.cm.Blues(0.4 + 0.5 * i / 12) for i in range(12)],
            edgecolor='white')
axes[0].axhline(por_mes['conteo'].mean(), color='tomato',
                linestyle='--', linewidth=1.5, label='Media mensual')

```

```

axes[0].set_xticks(range(1, 13))
axes[0].set_xticklabels(meses_nombres)
axes[0].set_title('Distribución mensual de sismos\n(suma 2000–2024)', fontsize=12, fontweight='bold')
axes[0].set_ylabel('Número de eventos')
axes[0].legend()

# --- Magnitud media mensual ---
mag_mes = df.groupby('mes')['magnitud'].mean()
axes[1].plot(mag_mes.index, mag_mes.values, 'o-',
             color=UNGRD_BLUE, linewidth=2, markersize=7)
axes[1].fill_between(mag_mes.index, mag_mes.values,
                    mag_mes.values.min(), alpha=0.1, color=UNGRD_BLUE)
axes[1].set_xticks(range(1, 13))
axes[1].set_xticklabels(meses_nombres)
axes[1].set_title('Magnitud promedio mensual', fontsize=12, fontweight='bold')
axes[1].set_ylabel('Magnitud media (M)')

plt.tight_layout()
plt.savefig('variacion_estacional.png', bbox_inches='tight', dpi=150)
plt.show()

```

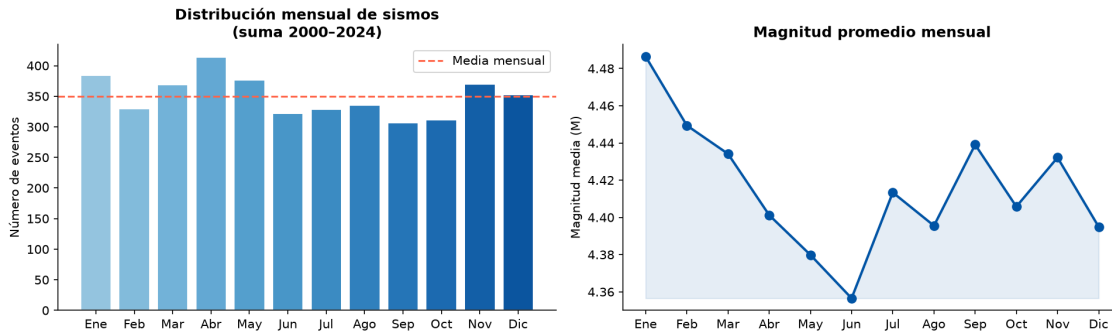


Figure 4: Variación estacional de la sismicidad en Colombia. Izquierda: distribución mensual del número de eventos (suma 2000–2024). Derecha: magnitud promedio mensual.

11. RESUMEN DEL ANÁLISIS Y PRÓXIMOS PASOS

Este cuaderno realizó un análisis exploratorio de la sismicidad de Colombia usando únicamente datos públicos y herramientas de código abierto. Los resultados ilustran el carácter **multiamenaza** del territorio y la riqueza de información disponible para análisis de riesgo sísmico.

```

print('=' * 60)
print(' RESUMEN – SISMICIDAD DE COLOMBIA 2000–2024')
print('=' * 60)
print(f' Total de eventos M ≥ 3.0:      {len(df):,}')
print(f' Magnitud máxima registrada:    M {df["magnitud"].max():.1f}')
print(f' Magnitud media:                  M {df["magnitud"].mean():.2f}')
print(f' Profundidad media:               {df["profundidad_km"].mean():.1f} km')
print(f' Eventos superficiales (≤70):    {(df["profundidad_km"]<=70).sum():,}')
print(f' {(df["profundidad_km"]<=70).mean()*100:.1f}%')
print(f' Período de análisis:             2000–2024 (25 años)')
print(f' b-value Gutenberg-Richter:       {b:.3f}')
print('=' * 60)
print()
print('Archivos generados:')
print(' 📊 sismicidad_temporal.png')
print(' 📊 gutenbergrichter.png')
print(' 📊 profundidad_focal.png')
print(' 📊 variacion_estacional.png')
print(' 🗺️ mapa_sismicidad_colombia.html')

```

=====

RESUMEN – SISMICIDAD DE COLOMBIA 2000–2024

```
=====
Total de eventos M ≥ 3.0:      4,201
Magnitud máxima registrada:   M 7.8
Magnitud media:               M 4.42
Profundidad media:            81.1 km
Eventos superficiales (≤70):  2,290 (54.5%)
Período de análisis:          2000–2024 (25 años)
b-value Gutenberg-Richter:    0.854
=====
```

Archivos generados:

-  sismicidad_temporal.png
-  gutenberg_richter.png
-  profundidad_focal.png
-  variacion_estacional.png
-  mapa_sismicidad_colombia.html

PRÓXIMOS PASOS Y EXTENSIONES

Este cuaderno puede extenderse de múltiples maneras. Algunas ideas para contribuciones a la plataforma:

Extensión	Descripción	Complejidad
Microzonificación	Cruzar catálogo sísmico con datos de suelo y NSR-10 para análisis local	★★★
PSHA simplificado	Implementar curvas de peligro sísmico con OpenQuake para ciudades principales	★★★★★
Enjambres sísmicos	Detección automática de enjambres con algoritmos de clustering (DBSCAN)	★★★
Relación lluvia-sismo	Correlación entre precipitación intensa y sismicidad inducida	★★★
Alerta temprana	Simular un sistema de detección en tiempo real con la API del USGS	★★★★★
ML para clasificación	Clasificar tipos de sismo con aprendizaje automático	★★★★★

REFERENCIAS

- USGS Earthquake Hazards Program. *FDSN Event Web Service*. <https://earthquake.usgs.gov/fdsnws/event/1/>
- Servicio Geológico Colombiano. *Catálogo de Sismicidad de Colombia*. <https://www.sgc.gov.co>
- Gutenberg, B. & Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188.
- UNGRD (2023). *Atlas de Riesgo de Colombia*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- UNDRR-ROAS (2024). *Inteligencia artificial para la reducción del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe*.