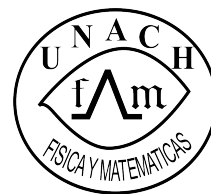




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIAPAS

FACULTAD DE CIENCIAS EN FÍSICA Y
MATEMÁTICAS



titulo

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN MATEMÁTICAS APLICADAS

PRESENTA:

ÁNGELA YANELI ORTIZ DÍAZ

DIRECTOR:

Dr. Yofre Hernán García Gómez

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a del 2025.

Tabla de contenidos

1. thesis	3
1.1. Quarto	3
I. Estudio de caso	6
Adaptación de PageRank a redes territoriales del estado de Chiapas: Un enfoque basado en cadenas de Markov	7
Problemas en la red y solución de PageRank	7
Nodos colgantes	7
Subgrafos absorbentes	8
4. Metodología	9
4.1. Recolección de datos	9
4.2. “Cálculo de distancia 3D de rutas geográficas usando datos OSRM y elevación”	9
6. Mapa con Folium	17
7. Mapa interactivo con Folium	18

1. thesis

1.1. Quarto

Quarto enables you to weave together content and executable code into a finished document. To learn more about Quarto see <https://quarto.org>.

2.

3.

Part I.

Estudio de caso

Adaptación de PageRank a redes territoriales del estado de Chiapas: Un enfoque basado en cadenas de Markov

En situaciones de emergencia, como desastres naturales o crisis humanitarias, es fundamental contar con mecanismos eficientes para distribuir ayuda y recursos a la población afectada. En regiones como el estado de Chiapas que cuenta con 124 municipios según el INEGI, contando con una geografía montañosa y la dispersión de los municipios dificultan la conectividad, se vuelve especialmente importante identificar puntos estratégicos dentro de la red territorial que puedan facilitar la logística y la respuesta rápida.

Para abordar este desafío, se propone aplicar el algoritmo PageRank, desarrollado por Larry Page y Sergey Brin como parte del motor de búsqueda de Google, con el fin de priorizar municipios según su importancia dentro de la red de transporte intermunicipal. Este algoritmo, basado en un modelo de cadenas de Markov, mide la relevancia de cada nodo (municipio) al simular el recorrido de un “navegante aleatorio” que transita la red con cierta probabilidad de seguir conexiones o saltar aleatoriamente a otro nodo.

En términos prácticos, PageRank estima la probabilidad estacionaria de una cadena de Markov con un número finito de estados describiendo la fracción de tiempo que, en promedio, el sistema permanece en cada estado cuando se observa durante un periodo suficientemente largo (REFERENCIA), lo cual permite identificar aquellos municipios que, por su posición estratégica y conectividad, tienen mayor influencia dentro del sistema territorial. Esta información es clave para diseñar estrategias de distribución de ayuda, optimización de rutas y toma de decisiones en situaciones críticas.

En este estudio de caso, se aplica PageRank a la red territorial del estado de Chiapas, representando los municipios como nodos y las rutas entre ellos como enlaces ponderados por distancia. El objetivo es obtener una clasificación de los municipios más centrales o influyentes, que puedan actuar como puntos clave en escenarios de distribución logística.

Problemas en la red y solución de PageRank

En el análisis de una red de nodos, existen dos factores que pueden obstaculizar la convergencia hacia una distribución estacionaria, estos factores son: - los nodos colgantes
- subgrafos ansorbentes

Nodos colgantes

Los nodos colgantes hace referencia a las páginas que no tiene enlaes de salida. En el contexto de una red territorial, este fenómeno se manifiesta en municipios que no tienen

conexión con otros municipios. En el caso del estado de Chiapas, no se identificaron nodos colgantes en la red analizada.

El algoritmo PageRank soluciona este problema modificando la matriz de red. Sea N la matriz de red (REFERENCIA), donde cada entrada n_{ij} representa la conexión desde el nodo j hacia el nodo i , donde $i, j \in \mathbb{N}$. Para abordar el problema de nodos colgantes, se redefine la matriz de transición Q donde la entrada i que tiene entradas cero (nodos colgantes) se reemplaza por $\frac{1}{k}$ donde k es número totales de páginas o municipios, esta corrección nos garantiza que la matriz de transición Q sea estocástica.

Subgrafos absorbentes

Cuando existen subgrafos absorbentes dentro de la red. Estos corresponden a conjuntos de páginas (o nodos) que están interconectados entre sí pero no tienen enlaces de salida hacia el resto de la red, es decir, hacen un ciclo. En el contexto de la red territorial, esto se representa en los municipios que únicamente están conectados entre sí, formando un subconjunto cerrado que puede atrapar al navegante en un ciclo sin posibilidad de salir.

Para resolver este problema, los creadores del algoritmo PageRank introdujeron un mecanismo llamado factor de amortiguación. Este consiste en asumir de la red una probabilidad $1 - p$ de teletransportarse aleatoriamente a cualquier otro nodo del grafo.

Usualmente se toma $p = 0.85$, esto significa que en un 85% de los casos el navegante sigue los enlaces y el 15% restante salta aleatoriamente a cualquier otro nodo.

Con los ajustes mencionados se obtiene una matriz de transición modificada que se define como:

$$P := pQ + (1 - p)A$$

donde, A es una matriz cuadrada con todas las entradas $\frac{1}{k}$ representando una conexión aleatoria uniforme. La matriz resultante P garantiza que el algoritmo funcione correctamente y siempre llegue a una solución estable, debido a que al ser estocástica, asegura que desde cada nodo siempre conserve la probabilidad total en cada paso del proceso; al ser aperiódica, evita que el sistema quede atrapado en ciclos repetitivos; y al ser irreducible, garantiza que todos los nodos estén conectados de alguna forma, permitiendo que eventualmente se pueda llegar a cualquier parte de la red.

4. Metodología

En esta sección se describe

4.1. Recolección de datos

El estudio utilizó dos fuentes principales de datos geoespaciales:

1. Datos de rutas:

- Obtenidos mediante la API de [Open Source Routing Machine](#) (OSRM).
- El formato usado son Coordenadas geográficas en WGS84 ([*latitud*, *longitud*]) para cada punto de la ruta.

2. Datos de elevación:

- La información utilizada proviene del Modelo Digital de Elevación (DEM) generado por la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA, disponible en NASA Earthdata (<https://earthdata.nasa.gov/>). Los datos cuentan con una resolución espacial de 30 metros y se distribuyen en teselas de $1^\circ \times 1^\circ$ de latitud y longitud. Cada archivo ráster SRTM está conformado por una malla regular de celdas (píxeles), en la cual cada celda almacena un valor de elevación del terreno expresado en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). Para cubrir áreas de mayor extensión, como un estado, un país o una región montañosa, es necesario integrar estas teselas, lo que permite generar una capa continua y sin discontinuidades del relieve, denominada **mosaico ráster**.

4.2. “Cálculo de distancia 3D de rutas geográficas usando datos OSRM y elevación”

Para estimar la longitud real de una carretera considerando las variaciones de altitud del terreno, se utiliza una formulación basada en la distancia geodésica entre puntos sucesivos de una ruta, combinada con la diferencia de elevaciones. Esto permite obtener una distancia tridimensional (3D) más realista, que considera tanto la curvatura terrestre como los cambios topográficos.

Sea una ruta discretizada por N puntos geográficos con coordenadas: $P_i = (\phi_i, \lambda_i)$ para $i = 1, \dots, N$ donde: ϕ_i es la latitud de punto i y λ_i es la longitud del punto i . La distancia superficial (2D) entre dos puntos consecutivos se calcula utilizando la fórmula de Vincenty o usando elipsoide WGS84 (World Geodetic System 1984), el cual se calcula mediante la siguiente expresión

$$d_i^{2D} := \text{GeodInv}(\phi_{i-1}, \lambda_{i-1}, \phi_i, \lambda_i),$$

que representa la distancia geodésica 2D entre los puntos P_{i-1} y P_i , calculada sobre la superficie de la Tierra.

Por otro lado, para estimar la distancia real de una carretera, considerando las variaciones del terreno (con elevación), se considera la ruta como una secuencia de puntos geográficos $P_i = (\phi_i, \lambda_i)$ y h_i la elevación en metros sobre el nivel del mar del punto i , extraída del mosaico ráster de altitudes mediante la interpolación espacial. La distancia entre dos puntos consecutivos se calcula como

$$d_i^{3D} := \sqrt{(d_i^{2D})^2 + (\Delta h_i)^2},$$

siendo $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$ el cambio de altitud entre dos puntos consecutivos.

La distancia total proyectada (2D) y la distancia real sobre el terreno (3D) son respectivamente

$$D^{(2D)} := \sum_{i=1}^{N-1} d_i^{(2D)},$$

y

$$D^{(3D)} := \sum_{i=1}^{N-1} d_i^{(3D)}.$$

```
from google.colab import drive
import requests
import csv
import time
from urllib.parse import quote
import folium
import math
import rasterio
from rasterio.merge import merge
from shapely.geometry import LineString
import numpy as np
from pyproj import Geod
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from IPython.display import display
```

```

# Montar Google Drive
drive.mount('/content/drive')

# Instalar librerías necesarias
!pip install rasterio geopandas pyproj folium

# Configuración de ciudades
ciudades = [
    "Acacoyagua", "Acala", "Acapetahua", "Aldama", "Altamirano", "Amatán",
    "Amatenango de la Frontera", "Amatenango del Valle", "Ángel Albino Corzo",
    "Arriaga", "Bejucal de Ocampo", "Bella Vista",
    "Benemérito de las Américas", "Berriozábal", "Bochil", "Cacahoatán",
    "Capitán Luis Ángel Vidal", "Catazajá", "Chalchihuitán", "Chamula",
    "Chanal", "Chapultenango", "Chenalhó", "Chiapa de Corzo", "Chiapilla",
    "Chicoasén", "Chicomuselo", "Chilón", "Cintalapa de Figueroa", "Coapilla",
    "Comitán de Domínguez", "Copainalá", "El Bosque", "El Parral",
    "El Porvenir", "Emiliano Zapata", "Escuintla", "Francisco León",
    "Frontera Comalapa", "Frontera Hidalgo", "Honduras de la Sierra",
    "Huehuetán", "Huitiupán", "Huixtán", "Huixtla", "Ixhuatán",
    "Ixtacomitán", "Ixtapa", "Ixtapangajoya", "Jiquipilas", "Jitotol",
    "Juárez", "La Concordia", "La Grandeza", "La Independencia",
    "La Libertad", "La Trinitaria", "Larráinzar", "Las Margaritas",
    "Las Rosas", "Mapastepec", "Maravilla Tenejapa", "Marqués de Comillas",
    "Mazapa de Madero", "Mazatán", "Metapa", "Mezcalapa", "Mitontic",
    "Montecristo de Guerrero", "Motozintla", "Nicolás Ruíz", "Ocosingo",
    "Ocotepéc", "Ocozocoautla de Espinosa", "Ostuacán", "Osumacinta",
    "Oxchuc", "Palenque", "Pantelhó", "Pantepec", "Pichucalco",
    "Pijijiapan", "Pueblo Nuevo Solistahuacán", "Rayón", "Reforma",
    "Rincón Chamula San Pedro", "Sabanilla", "Salto de Agua",
    "San Andrés Duraznal", "San Cristóbal de las Casas", "San Fernando",
    "San Juan Cancuc", "San Lucas", "Santiago el Pinar", "Siltepec",
    "Simojovel", "Sitalá", "Socoltenango", "Solosuchiapa", "Soyaló",
    "Suchiapa", "Suchiate", "Sunuapa", "Tapachula", "Tapalapa", "Tapilula",
    "Tecpatán", "Tenejapa", "Teopisca", "Tila", "Tonalá", "Totolapa",
    "Tumbalá", "Tuxtla Chico", "Tuxtla Gutiérrez", "Tuzantán", "Tzimol",
    "Unión Juárez", "Venustiano Carranza", "Villa Comaltitlán",
    "Villa Corzo", "Villaflores", "Yajalón", "Zinacantan"
]
ciudades.sort()

# Funciones auxiliares
def cargar_mosaico_srtm():
    archivos_hgt = [

```

```

        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N17W094.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N17W093.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N17W092.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N16W095.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N16W094.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N16W093.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N15W094.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N15W092.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N14W093.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N16W091.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N15W093.hgt",
        "/content/drive/MyDrive/thesis/chiapas_hgt/N16W092.hgt"
    ]
    src_files = [rasterio.open(f) for f in archivos_hgt]
    mosaico, transform = merge(src_files)
    for src in src_files:
        src.close()
    return mosaico, transform

def obtener_coordenadas(ciudad):
    url = f"https://nominatim.openstreetmap.org/search?q={quote(ciudad+', Chiapas, México')}&format=json"
    response = requests.get(url, headers={'User-Agent': 'Mozilla/5.0'})
    data = response.json()
    if data:
        return (float(data[0]['lat']), float(data[0]['lon']))
    return None

def obtener_ruta_osrm(coord_origen, coord_destino):
    lon1, lat1 = coord_origen[1], coord_origen[0]
    lon2, lat2 = coord_destino[1], coord_destino[0]
    url = f"http://router.project-osrm.org/route/v1/driving/{lon1},{lat1};{lon2},{lat2}?overview=full&geometries=geojson"
    try:
        response = requests.get(url)
        data = response.json()
        if data['code'] == 'Ok':
            distancia = data['routes'][0]['distance']
            duracion = data['routes'][0]['duration']
            geometria = data['routes'][0]['geometry']['coordinates']
            return distancia, duracion, [(lat, lon) for lon, lat in geometria]
    except Exception as e:
        print(f"Error OSRM: {e}")

```

```

    return None, None, None

def calcular_distancia_3d_ruta(mosaico, transform, ruta_coords):
    geod = Geod(ellps="WGS84")
    distancia_3d = 0
    distancia_2d = 0
    elevaciones = []
    for coord in ruta_coords:
        lon, lat = coord[1], coord[0]
        try:
            col, row = ~transform * (lon, lat)
            elev = mosaico[0, int(row), int(col)]
            elevaciones.append(elev)
        except:
            elevaciones.append(np.nan)
    for i in range(1, len(ruta_coords)):
        lon1, lat1 = ruta_coords[i-1][1], ruta_coords[i-1][0]
        lon2, lat2 = ruta_coords[i][1], ruta_coords[i][0]
        elev1, elev2 = elevaciones[i-1], elevaciones[i]
        if np.isnan(elev1) or np.isnan(elev2):
            continue
        _, _, dist2d = geod.inv(lon1, lat1, lon2, lat2)
        delta_elev = elev2 - elev1
        dist3d = math.sqrt(abs(dist2d**2 + delta_elev**2))
        distancia_2d += dist2d
        distancia_3d += dist3d
    return distancia_2d, distancia_3d, elevaciones

# Proceso principal
mosaico, transform = cargar_mosaico_srtm()
coordenadas = {}
print("Obteniendo coordenadas...")
for ciudad in ciudades:
    coord = obtener_coordenadas(ciudad)
    if coord:
        coordenadas[ciudad] = coord
        print(f"{ciudad}: {coord[0]:.4f}, {coord[1]:.4f}")
    time.sleep(1)

archivo_salida =
    "/content/drive/MyDrive/thesis/ponencia_pagerank_distancia_chiapas
    /distancias_chiapas_carreteras_3d_completo.csv"
with open(archivo_salida, "w", newline=""),

```

```

encoding="utf-8") as file:
writer = csv.writer(file)
writer.writerow(["Origen", "Destino", "Distancia carretera (km)",
    "Distancia 3D (km)", "Diferencia (km)", "Tiempo estimado (min)"])

mapa = folium.Map(location=[16.75, -92.62], zoom_start=8)
colores = ['red', 'blue', 'green', 'purple', 'orange', 'darkred']

for i in range(len(ciudades)):
    for j in range(len(ciudades)):
        if i == j:
            continue
        origen = ciudades[i]
        destino = ciudades[j]
        if origen in coordenadas and destino in coordenadas:
            print(f"\nCalculando {origen} → {destino}...")
            coord_origen = coordenadas[origen]
            coord_destino = coordenadas[destino]
            distancia_ruta, duracion, ruta_coords =
                obtener_ruta_osrm(coord_origen, coord_destino)
            if ruta_coords:
                dist2d, dist3d, elevaciones =
                    calcular_distancia_3d_ruta(mosaico, transform,
                        ruta_coords)
                if dist2d > 0 and dist3d > 0:
                    dist_ruta_km = distancia_ruta/1000
                    dist3d_km = dist3d/1000
                    diferencia = dist3d_km - dist_ruta_km
                    tiempo_min = duracion/60
                    writer.writerow([origen, destino,
                        round(dist_ruta_km, 3), round(dist3d_km, 3),
                        round(diferencia, 3), round(tiempo_min, 1)])
                    color = colores[(i+j) % len(colores)]
                    folium.PolyLine(locations=ruta_coords, color=color,
                        weight=3, opacity=0.7, tooltip=
                            f"{origen} → {destino}<br>Distancia:
                                {dist_ruta_km:.1f}km<br>Tiempo:
                                    {tiempo_min:.1f}min").add_to(mapa)
                    folium.Marker(location=coord_origen, popup=origen,
                        icon=folium.Icon(color='green')).add_to(mapa)
                    folium.Marker(location=coord_destino, popup=destino,
                        icon=folium.Icon(color='red')).add_to(mapa)
            time.sleep(1)

```


5.

6. Mapa con Folium

7. Mapa interactivo con Folium

```
import folium

# Crear el mapa centrado en Tuxtla Gutiérrez
mapa = folium.Map(location=[16.7529, -93.1169], zoom_start=13)

# Agregar un marcador
folium.Marker(
    [16.7529, -93.1169],
    tooltip="Tuxtla Gutiérrez",
    popup="Capital de Chiapas"
).add_to(mapa)

# Guardar el mapa como archivo HTML para Selenium
mapa.save("mapa_folium.html")
```

```
import IPython
IPython.display.display(mapa)
```

<folium.folium.Map at 0x21f74952510>

```
# Captura del mapa como imagen PNG para incluir en PDF
# Captura del mapa como imagen PNG para incluir en PDF
import os
from selenium import webdriver
from selenium.webdriver.chrome.options import Options
from PIL import Image
import time

if not os.path.exists("mapa_folium.png"):
    options = Options()
    options.add_argument('--headless')
    options.add_argument('--disable-gpu')
    options.add_argument('--disable-dev-shm-usage')
    options.add_argument("--window-size=800,600")
```

```

driver = webdriver.Chrome(options=options)

driver.get("file://" + os.path.abspath("mapa_folium.html"))
time.sleep(2) # Esperar a que cargue el mapa

# Forzar fondo blanco (evita fondo negro)
driver.execute_script("document.body.style.background = 'white';")

# Intentar capturar el contenedor del mapa directamente
try:
    map_element = driver.find_element("id", "map")
    map_element.screenshot("mapa_folium.png")
except:
    # Si no encuentra el ID, captura toda la pantalla y recorta
    driver.save_screenshot("mapa_folium_full.png")
    img = Image.open("mapa_folium_full.png")
    crop = img.crop((0, 0, 800, 600))
    crop.save("mapa_folium.png")

driver.quit()

```

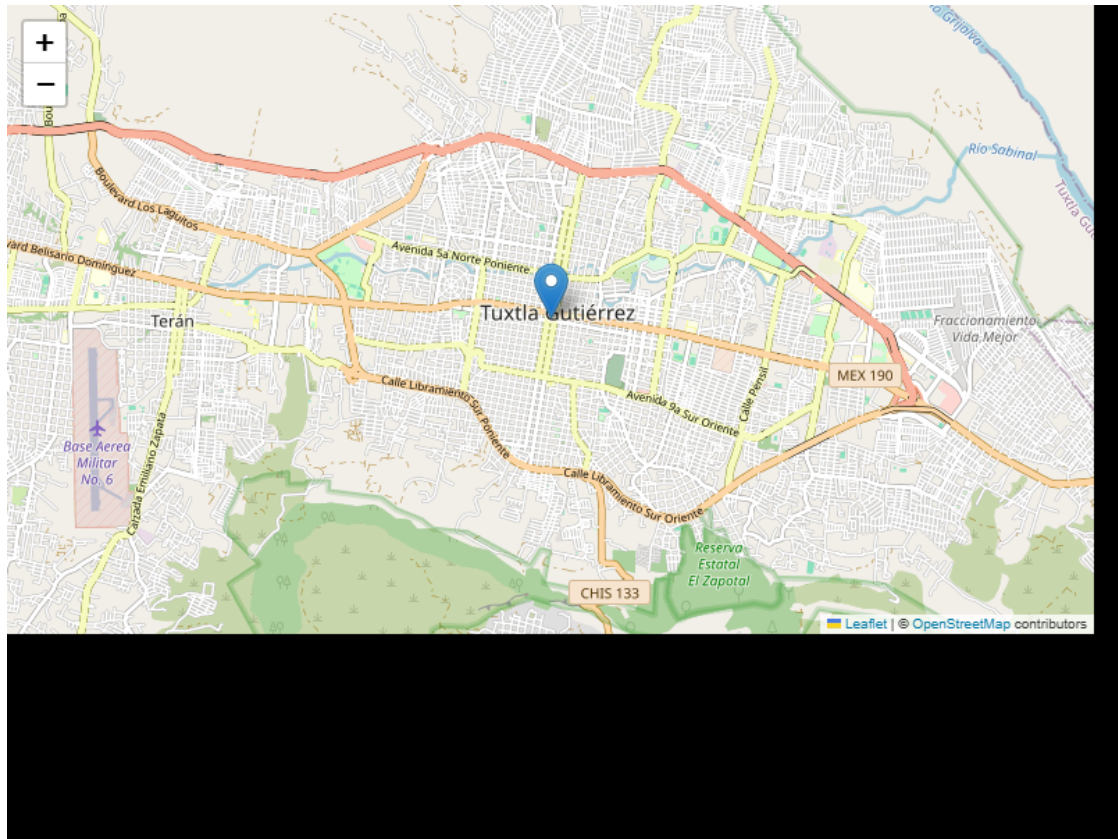


Figura 7.1.: Mapa generado con Folium