

GeoCNES: mapeo de la salud en ciudades de Brasil – una aplicación automatizada para ayudar en la toma de decisiones

Lucas Brandão Monteiro de Assis (<https://orcid.org/0000-0002-8338-8535>)^{1,2}

Francisco Roza de Moraes (<https://orcid.org/0000-0002-7413-6467>)¹

Paulo Cesar Lima Segantine (<https://orcid.org/0000-0003-1012-0666>)¹

Miguel José das Neves Pires Amado (<https://orcid.org/0000-0002-9152-4226>)²

Irineu da Silva (<https://orcid.org/0000-0001-5775-6683>)¹

Resumen Garantizar un acceso equitativo a las unidades de salud es crucial para el bienestar urbano, pero las barreras geográficas a menudo obstaculizan este acceso. Este artículo presenta GeoCNES, una herramienta de código abierto desarrollada en Python para abordar este desafío. GeoCNES se conecta al CNES y a los datos censales brasileños y aplica técnicas de geocodificación para generar automáticamente mapas interactivos que muestran la distribución de las unidades de salud y su concentración a través de mapas de calor en municipios brasileños. Los usuarios utilizan el código municipal y el tipo de unidad a analizar como parámetros, y GeoCNES recupera, geolocaliza y muestra los datos en mapas. Este artículo detalla el proceso de desarrollo, las funcionalidades y las limitaciones de GeoCNES, demostrando su aplicación en las ciudades de São Carlos-SP, Rondonópolis-MT, Chapecó-SC, Parnamirim-RN y Parauapebas-PA. Aunque se encontraron desafíos relacionados con la inconsistencia de datos, GeoCNES es capaz de mapear con éxito las unidades de salud de diferentes regiones del país y generar mapas con potencial para ayudar en la planificación urbana orientada a la equidad en la salud.

Palabras clave Mapeo de la atención de salud, Sistema de información geográfica, Análisis espacial, Planificación de salud, Python

¹ Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trab. São Carlsense 400, Parque Arnold Schmidt. 13566-590 São Paulo SP Brasil. lucasbrandao@usp.br

² CITUA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa Portugal.

Introducción

El bienestar de una población está intrínsecamente relacionado con la facilidad de acceso a las instalaciones de atención médica, lo cual puede ser influenciado tanto por factores no espaciales como espaciales. Los factores no espaciales abarcan aspectos como el estado de salud de un individuo, las circunstancias socioeconómicas y la red de apoyo social. Mientras tanto, los factores espaciales involucran la ubicación y la distancia de las instalaciones de salud desde el lugar de origen de los usuarios, desempeñando un papel crucial en garantizar un acceso equitativo a los servicios de salud^{1,2}.

A pesar de la disponibilidad de servicios de salud, muchos individuos enfrentan obstáculos geográficos que impiden su capacidad para acceder a estos servicios esenciales^{3,4}. Por ejemplo, aproximadamente el 18.1% de la población enfrenta un nivel crítico de accesibilidad, lo que a menudo resulta en una atención incompleta y compromete sus resultados de salud⁵. Esta es una experiencia preocupante, considerando que proporcionar un acceso equitativo a todos los servicios y recursos y superar las inequidades en el espacio urbano es uno de los mayores desafíos para las ciudades en la actualidad⁶.

En este contexto, el tercer Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS), propuesto por las Naciones Unidas (ONU), se vuelve aún más crucial. Este objetivo tiene como propósito garantizar vidas más saludables y promover el bienestar para todos, centrándose específicamente en lograr una cobertura universal de salud mediante el acceso a servicios de salud esenciales⁷. Por lo tanto, considerar las barreras geográficas al acceso a la atención médica no solo es esencial para cumplir los ODS, sino también crítico para garantizar resultados de salud equitativos y abordar el problema más amplio de las inequidades urbanas.

Un problema notable en Brasil está en la conexión entre la asignación de nuevas instalaciones públicas y los intereses políticos electorales de los actores públicos involucrados. Estos actores, que a menudo carecen de conocimientos sobre aspectos técnicos y metodologías que podrían mejorar la efectividad de la red de atención médica, están principalmente enfocados en la promoción social inmediata que podría generar ventajas políticas futuras⁸. Además, la falta de acceso a software adecuado y la dificultad para capacitar a profesionales se convierten en otro desafío para utilizar técnicas apropiadas⁹.

El enfoque actual para planificar instalaciones de salud, de diversos tipos, es inadecuado y comprende diferentes intereses, lo que conduce a varias consecuencias perjudiciales. Desde el punto de vista financiero, esta falta de planificación ade-

cuada resulta en el uso ineficiente de los recursos públicos. La localización de instalaciones de salud con un método inapropiado a menudo requiere más financiamiento, desviando recursos de otros servicios de salud esenciales. Además, una planificación inadecuada puede resultar en un suministro insuficiente de instalaciones de salud, lo cual afecta a las áreas desatendidas y disminuye la accesibilidad para los usuarios. Esta escasez de servicios impacta desproporcionadamente aquellos que más lo necesitan, exacerbando las inequidades en salud y comprometiendo la calidad general de la prestación de servicios de salud¹⁰.

La literatura presenta varias métricas y métodos que pueden proporcionar una planificación efectiva para el establecimiento de nuevas instalaciones de salud¹¹⁻¹⁴. Estas herramientas consideran factores como la densidad de población, las necesidades de atención médica, la accesibilidad y la infraestructura existente para identificar ubicaciones óptimas para nuevas instalaciones. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas valiosas para espacializar diferentes aspectos relacionados tanto con la demanda como con la oferta, y de esta manera, se presentan como una excelente herramienta para ayudar en la planificación de equipamientos públicos. Sin embargo, el software GIS solía ser costoso cuando no había alternativas de código abierto y aún hoy puede ser difícil de usar, lo que le puede hacer inviable en la vida cotidiana de la administración pública¹⁵.

En respuesta a estos desafíos, este artículo presenta GeoCNES, una herramienta computacional automatizada de código abierto diseñada meticulosamente para mejorar el proceso de planificación de instalaciones de salud. GeoCNES se basa en datos oficiales, de código abierto y actualizados de la infraestructura de salud existente, proporcionados por el Registro Nacional de Establecimientos de Salud – CNES (sigla en portugués) y el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística – IBGE, y se centra en generar mapas interactivos que ilustran la distribución de instalaciones de distintos niveles de atención en los municipios.

Revisión bibliográfica

El rápido crecimiento urbano, especialmente en los países de ingresos bajos y medios (LMIC, por sus siglas en inglés), amenaza con empeorar las desigualdades ya existentes¹⁶. La planificación urbana sostenible es crucial para un desarrollo saludable y equitativo en estas regiones. Sin embargo, las prácticas actuales en LMIC, como Brasil, a menudo priorizan ganancias políticas a corto plazo sobre la planificación a largo plazo^{17,18}, lo que conduce a un uso ineficiente de los recursos.

La planificación urbana efectiva requiere un enfoque integral que utilice datos, métricas y monitoreo continuo para comprender las necesidades de la comunidad y adaptar las políticas públicas en consecuencia¹⁹. El Departamento de Tecnología de la Información del SUS (DATA-SUS) sirve como un repositorio central de información extensa, incluidos datos sobre la utilización de servicios de salud, infraestructura de instalaciones de salud y datos demográficos del personal. Estos datos no solo informan la toma de decisiones, sino que también juegan un papel crucial en el desarrollo de programas efectivos de acción en salud¹⁰.

DATASUS constituye una extensa variedad de sistemas de información que abarcan diversos datos y sectores dentro del SUS. El CNES desempeña un papel fundamental al proporcionar a los gestores públicos una visión integral del panorama social y de salud en las regiones y municipios brasileños. Estos datos invaluable permiten la formulación e implementación de políticas públicas efectivas basadas en información precisa y actualizada sobre las instalaciones de salud a nivel nacional²⁰.

Sin embargo, a pesar de su extenso repositorio de datos, la implementación web del CNES presenta desafíos en la difusión efectiva de información sobre las instalaciones de salud²¹. La dependencia de términos altamente específicos sin soporte visual a menudo dificulta la representación precisa de la ubicación de las instalaciones de salud, limitando así el acceso de los usuarios al sistema y sus datos valiosos²².

Existen varias formas de abordar la visualización espacial de sistemas de salud, una de ellas es la geocodificación, que según el Earth Science Research Institute – ESRI²³, implica transformar descripciones de ubicación, como direcciones o coordenadas geográficas, en información espacial precisa referenciada a la superficie terrestre. Al incorporar técnicas de geocodificación, el CNES puede traducir de manera efectiva datos descriptivos en representaciones espaciales significativas, facilitando así la identificación de la ubicación y distribución de las instalaciones de salud.

La calidad de la geocodificación puede evaluarse mediante diversos medios, no limitándose únicamente a la precisión posicional de la información. La norma ISO-19157 – Información Geográfica – considera importante evaluar cinco grupos clave de elementos: la completitud, la consistencia lógica, la precisión posicional, la precisión temática y la calidad temporal de las características²⁴. Sin embargo, debido a la naturaleza informativa de esta norma, algunos autores²⁵ han adaptado los conjuntos de elementos para la evaluación de calidad, empleando solo tres elementos de análisis:

- . Completeness evalúa la correspondencia real de la geocodificación y analiza la calidad temporal del conjunto de datos para determinar la validez temporal de los datos analizados.

- . Positional accuracy evalúa la ubicación posicional de los elementos presentes en la base de datos.

- . Data repeatability indica la consistencia de los resultados obtenidos al consultar la base de datos respecto a los cambios posicionales en las regiones mapeadas.

En el panorama actual, las bases de datos geográficas mantenidas por empresas privadas como Google y Microsoft, así como el esfuerzo colaborativo de OpenStreetMap, son las herramientas de geocodificación más prevalentes, y han logrado avances significativos en la creación de Interfaces de Programación de Aplicaciones (API) accesibles y amigables para los usuarios²⁶. Estas API están diseñadas para simplificar el desarrollo e integración de aplicaciones informáticas a través de diferentes lenguajes computacionales, con diversos grados de funcionalidad y calidad de geocodificación. Estas variaciones surgen de la extensa cantidad de datos e información relacionada con diversas fuentes públicas y privadas que constituyen las bases de datos, convirtiéndolas en productos altamente valiosos para las empresas²⁷.

La integración de API de empresas reconocidas, como Google y OpenStreetMap, ha revolucionado el desarrollo de aplicaciones geográficas integrales, empoderando a los tomadores de decisiones en diversos dominios de gestión. Estas API ofrecen capacidades sofisticadas de geolocalización y mapeo, facilitando la integración con sus extensas y actualizadas bases de datos geográficas. Esta integración promueve respuestas de consulta más confiables y de alta calidad, mejorando la efectividad del análisis geoespacial²⁸.

Consecuentemente, esta integración facilita la espacialización y conversión de información, como la distribución de instalaciones de salud, en mapas informativos. Estas representaciones visuales permiten a los planificadores urbanos identificar y analizar patrones de distribución de infraestructura de servicios de salud, revelando inequidades en el acceso a servicios de salud. Esta capacidad permite a los planificadores urbanos tomar decisiones bien informadas sobre la ubicación de nuevas instalaciones de salud, garantizando un acceso equitativo a la atención médica para todos los residentes¹⁵.

En el contexto de la salud pública, estas aplicaciones emergen como herramientas invaluable para las autoridades administrativas involucradas en la planificación e implementación de nuevas instalaciones de salud. Al proporcionar datos en tiempo real sobre la distribución de la población, las necesidades de atención médica y la disponi-

bilidad de infraestructura, estas herramientas facilitan la identificación de áreas estratégicas para la expansión de los servicios de salud. Este enfoque basado en datos agiliza la toma de decisiones en la definición de la geolocalización de nuevas instalaciones de salud, optimizando la asignación de recursos y maximizando los resultados de salud pública.

Métodos

La planificación efectiva de la ubicación de instalaciones de salud requiere una base de datos robusta y actualizada. Si bien las bases de datos accesibles ofrecen información detallada, gestionar el análisis de datos puede ser desafiante. Para abordar este desafío, se desarrolló GeoCNES, una aplicación basada en Python, para facilitar el diagnóstico de planificación de salud.

GeoCNES es una herramienta automatizada basada en dos parámetros clave: el código IBGE del municipio y el código CNES de la instalación. La aplicación genera un mapa interactivo de la distribución de instalaciones de salud con una distribución de densidad de estas, y una relación de instalaciones por habitantes de ese municipio.

Debido a su popularidad, variedad y flexibilidad, se eligió Python (en su versión 3.12.2) como lenguaje de programación para desarrollar esta herramienta, para facilitar futuras expansiones y el desarrollo de funcionalidades tanto por parte de los creadores como de los usuarios interesados. Para garantizar esto, el código fue indentado, permitiendo claridad para quienes leen el código, posibilitando la replicación y utilización para diferentes aplicaciones por terceros usuarios.

GeoCNES recupera datos de las bases de datos CNES e IBGE, almacenando información esencial en variables algorítmicas, procesándolas hasta determinar las coordenadas de la instalación que permiten la creación del mapa interactivo. La Figura 1 muestra una visión general de la funcionalidad de GeoCNES, los procesos presentados en ella se discuten durante esta sección.

Instalación del paquete y primeros pasos

Para comenzar a usar GeoCNES es necesario instalar el paquete informático disponible en GitHub. Una vez que el usuario accede a la página, el código puede ser recuperado y cargado en el entorno de Python para iniciar.

La aplicación GeoCNES opera con solo dos parámetros de entrada proporcionados por el usuario

1) el código del municipio, designado por el IBGE, que consta de siete dígitos, donde los dos primeros corresponden a la unidad federativa²⁹,

que se puede consultar en la página Ciudades del IBGE;

2) el código específico del tipo de establecimiento de salud, compuesto por dos dígitos, según la documentación del CNES³⁰.

Después de ingresar los parámetros, la aplicación pasa por un proceso de validación y, si los datos ingresados son válidos, se crea un nuevo directorio en la carpeta de trabajo para almacenar los archivos necesarios para el funcionamiento de la aplicación.

Consultas en las bases de datos del CNES y del IBGE

El proceso de datos que ocurre después de la etapa de entrada consiste en consultar las bases de datos del CNES y del IBGE. Para hacer esto, GeoCNES depende de las bibliotecas Numpy, Pandas, OS, Requests, URLLib, ZipFile y Xarray, que permiten la gestión de datos alfanuméricos almacenados en marcos de datos y repositorios en línea. Ambas fuentes de datos tienen URLs estandarizadas que varían según los dos códigos solicitados por el usuario.

La primera conexión de la aplicación es con la base de datos del IBGE referente al censo de 2010, para descargar los datos geográficos de los sectores censales, lo cual se realiza reemplazando el código del estado en el siguiente enlace:

[geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/2021/Malha_de_setores_\(shp\)_por_UFs/\[state_code\]/\[state_code\]_Setores_2021.zip](https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/2021/Malha_de_setores_(shp)_por_UFs/[state_code]/[state_code]_Setores_2021.zip)

Luego, el algoritmo descomprime y escanea los archivos adquiridos, manteniendo únicamente los archivos geográficos relevantes para la ciudad en estudio. La segunda consulta se realiza en el sistema CNES y sigue un proceso similar, en el cual los códigos de la ciudad, estado y tipo de establecimiento de salud se utilizan como reemplazo en partes específicas del siguiente URL, el cual proporciona una lista de todos los establecimientos de un tipo específico en el mismo municipio según el mes previo a la consulta.

[cnes2.datasus.gov.br/Mod_Ind_Unidade_Listar.asp?VTipo=\[HF_type\]&VListar=1&Vestado=\[state_code\]&Vmun=\[city_code\]&VsubUni=&Vcomp=00](https://cnes2.datasus.gov.br/Mod_Ind_Unidade_Listar.asp?VTipo=[HF_type]&VListar=1&Vestado=[state_code]&Vmun=[city_code]&VsubUni=&Vcomp=00)

La lista obtenida comprende el número de registro y el nombre de todos los establecimientos, que son las dos informaciones necesarias como parámetro para la próxima consulta, que reemplaza esos códigos en el siguiente enlace para obtener la dirección de cada establecimiento.

[https://cnes2.datasus.gov.br/cabecalho_reduzido.asp?VCod_Unidade=\[HF_code\]](https://cnes2.datasus.gov.br/cabecalho_reduzido.asp?VCod_Unidade=[HF_code])

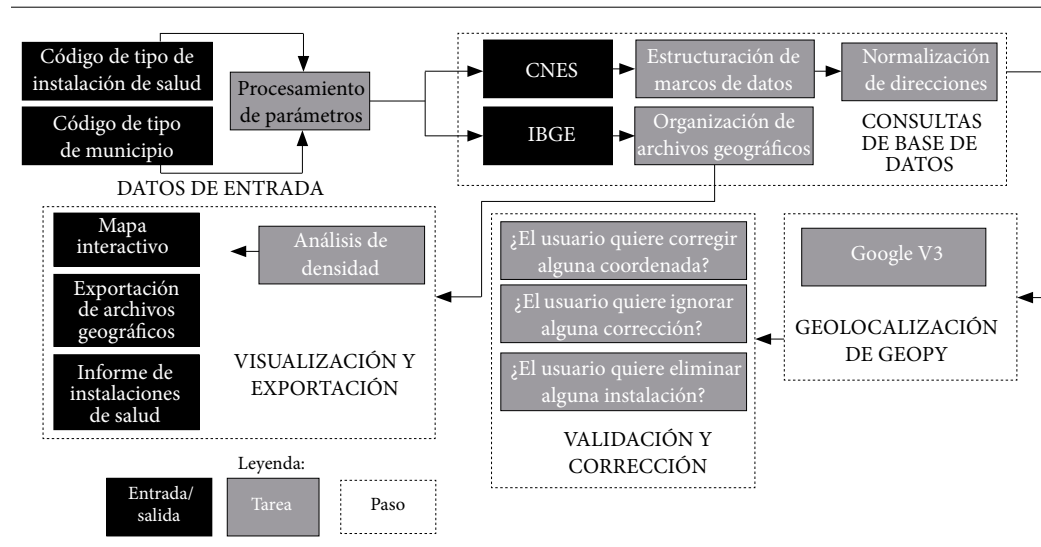


Figura 1. Descripción general del algoritmo GeoCNES.

Fuente: Autores.

Cada consulta realizada produce una amplia gama de datos sobre las instalaciones de salud, como su nombre, dirección, organización responsable y mucha otra información. Para cumplir con los objetivos de GeoCNES, los datos fueron sometidos a un proceso de extracción en el cual se ignoró la información innecesaria para identificar la ubicación de las instalaciones, mientras que la parte necesaria se almacenó en un nuevo marco de datos, donde cada línea corresponde a una instalación de salud y cada columna es un campo de información de dirección.

El proceso de extracción es recursivo y atraviesa todas las entradas de la lista. Cuando se completa la extracción, se realiza una normalización de la dirección para concatenar la información en un solo campo, estructurado en la siguiente secuencia: nombre de la instalación, calle, número, complemento, barrio, código postal, ciudad y estado, separados por comas. De esta manera, todas las instalaciones están bien identificadas y pueden ser geolocalizadas.

Geolocalización de establecimientos de salud

El proceso de geolocalización consiste en consultar bases de datos específicas para obtener coordenadas geográficas correspondientes a datos alfanuméricos, como la dirección o una referencia espacial³¹. La solución de geocodificación en GeoCNES es proporcionada por la biblioteca

Geopy, un cliente Python que localiza coordenadas para direcciones, ciudades, países y puntos de referencia en todo el mundo³². Esta biblioteca está vinculada a diferentes geocodificadores, como GoogleV3, Nominatim, Bing y ArcGis³²⁻³⁷.

El proceso de geocodificación de esta herramienta está relacionado con las consultas enviadas al geocodificador que convierten las direcciones en coordenadas. Los detalles sobre cómo funciona el geocodificador no se presentan aquí, porque algunos de esos procesos están relacionados con algoritmos propietarios que no son muy públicos para usuarios de terceros.

Durante la concepción del trabajo se consideraron dos geocodificadores: Google V3 y Nominatim, debido a su reconocimiento mundial. Sin embargo, los resultados obtenidos por Nominatim mostraron menos precisión y exactitud, con más fallos en la identificación de diferentes instalaciones que Google V3. Este problema también fue identificado por Clemens³⁸, Das y Purves³⁹, y Serere⁴⁰, quienes señalaron que la limitación de Nominatim para manejar frases con diferentes ortografías y errores podría ser la causa de esta imprecisión, mientras que Google V3 tiene una mayor capacidad para localizar y limpiar coincidencias difusas en direcciones incorrectas, lo que resulta en un proceso de geocodificación más exitoso.

Debido a esto, se seleccionó Google V3 como el geocodificador aplicado en la aplicación, lo que requiere que el usuario cree una cuenta en Goo-

gle Maps Platform para obtener la clave API. El proceso de geolocalización de Google V3 es actualmente gratuito, pero está sujeto a limitaciones en el número de direcciones consultadas en una sola búsqueda.

Una vez concluido el registro del usuario y proporcionada la clave API a GeoCNES, todas las direcciones de la lista se geolocalizan y se crea un nuevo marco de datos geoespaciales, que almacena características de puntos. Aunque Google V3 es más exitoso en la geolocalización de las instalaciones, pueden encontrarse algunos errores, y para manejarlos se implementó también un proceso de validación y corrección.

Validación y corrección manual

A lo largo del desarrollo del algoritmo GeoCNES, especialmente en la etapa de geocodificación, se identificaron errores recurrentes. Estos errores comprendían principalmente la asignación incorrecta del punto de la instalación de salud, ya sea fuera de los límites del municipio o en el punto de identificación central de la ciudad. Para mitigar tales errores, se definió un proceso de validación de cuatro pasos que depende de la intervención del usuario:

. El primer paso implica la comparación de las coordenadas resultantes con las coordenadas centrales de la ciudad. Si estas coordenadas coinciden, se solicita al usuario que proporcione las coordenadas correctas de esa instalación o que excluya ese punto del análisis. Este error a menudo se debe a la información incompleta o desactualizada del CNES.

. El segundo paso verifica si las coordenadas de las instalaciones de salud se encuentran dentro de los límites de la ciudad. Si se notan discrepancias, se les da a los usuarios la opción de corregir las coordenadas de la instalación respectiva o de excluir esos establecimientos de su análisis.

. El tercer paso ofrece al usuario la opción de actualizar manualmente las coordenadas de establecimientos específicos.

. El cuarto paso permite al usuario seleccionar y excluir cualquier instalación de salud de su elección.

Al ofrecer este proceso de validación, GeoCNES busca asegurar la autonomía del usuario para observar y corregir cualquier situación derivada de una fuente de datos imprecisa o de un fallo en la geolocalización. El final de esta fase marca la consolidación de la base de datos geográfica utilizada para elaborar los mapas interactivos.

Visualización y exportación de datos

La última fase de GeoCNES es la exhibición de los resultados en los mapas interactivos. Esto

fue posible gracias a las bibliotecas Geoviews y Folium, que proporcionan los recursos necesarios para producir un análisis de mapa de calor de la distribución de las instalaciones y un mapa interactivo de la ciudad.

El mapa presentado muestra tres características geográficas diferentes: una capa de puntos con las instalaciones de salud, una capa de polígonos con las características de los tramos censales y una capa geográfica que representa la concentración de instalaciones. Estas capas geográficas se presentan sobre un mapa base.

La capa de puntos contiene la información de las instalaciones de salud, como su nombre, dirección y coordenadas. La capa de tramos censales se usa para identificar los límites de la ciudad y las áreas urbanas y rurales, mientras que el mapa de calor ayuda a identificar la concentración de instalaciones en la ciudad de manera más clara.

La opción de visualización interactiva permite al usuario acercar o alejar el mapa e identificar la información de las instalaciones con mayor precisión, al seleccionar cualquier instalación en el mapa, lo que hace que aparezca una ventana con la información de la instalación (nombre, dirección y coordenadas).

Además, los usuarios pueden exportar los datos procesados para usarlos en diferentes softwares. La función de exportación permite al usuario guardar los archivos geográficos presentados en el mapa interactivo en formato de archivo *geopackage*.

Resultados y discusiones

Esta sección presenta los resultados de la aplicación de GeoCNES y la discusión derivada de estos. Para verificar la funcionalidad de la aplicación, se realizaron cinco estudios de caso en cinco ciudades diferentes. La primera ciudad seleccionada fue São Carlos debido a la disponibilidad de datos sobre las instalaciones de salud provenientes de los trabajos previos de Assis y Segantine¹¹, con la intención de comparar las coordenadas presentadas por los autores con las ubicaciones resultantes del método GeoCNES.

São Carlos se encuentra en el estado de São Paulo, en la región Sudeste de Brasil. Las otras cuatro ciudades están regiones diferentes del país y se seleccionaron basándose en su similitud con São Carlos, considerando el número de habitantes, para enriquecer la discusión mediante una comparación justa entre la distribución de las instalaciones de salud entre ellas.

Dado que las instalaciones de atención primaria tienen una importancia significativa para los sistemas de salud, debido a su carácter de acceso universal y por tratarse del primer contacto con el

sistema de salud, los estudios de caso presentados concentraron el análisis en las instalaciones de salud de este nivel de atención.

Estudio de caso de São Carlos – SP

São Carlos, el estudio de caso principal para GeoCNES, tiene una población estimada de 254,857 habitantes en el censo de 2022⁴¹. La Figura 2 presenta los mapas de distribución de las instalaciones de atención primaria en São Carlos.

A partir del mapa de GeoCNES y los resultados de GeoCNES, es posible observar que las instalaciones de salud en São Carlos están bien distribuidas. Las principales lagunas se encuentran en la región central, que concentra más actividades comerciales, y en la esquina de la región Noroeste (Parque dos Flamboyants), que son barrios

recientes. Esta observación también es destacada por los hallazgos de Assis y Segantine¹¹ en su análisis de accesibilidad de las instalaciones de APS en São Carlos. Cuando se compararon las ubicaciones de las instalaciones de salud de GeoCNES con las del trabajo de Assis y Segantine¹¹, solo una instalación presentó un resultado fallido de geolocalización, lo que resultó en una diferencia con el trabajo de los autores; aparte de esto, todas las ubicaciones coincidieron y una instalación que no fue incluida en su trabajo fue identificada por GeoCNES.

En cuanto a la proporción de instalaciones por población, el Ministerio de Salud define que cada equipo de salud familiar es responsable de 4,000 personas, y en São Carlos la proporción de instalaciones por población es de 1 por cada 7,079 habitantes (como se puede ver en la Tabla 1), lo que es superior al objetivo oficial. Sin embargo, este no es un dato concluyente, ya que se requiere un análisis adicional para definir la cantidad de población de la ciudad que realmente tiene una demanda regular de estas instalaciones de salud.

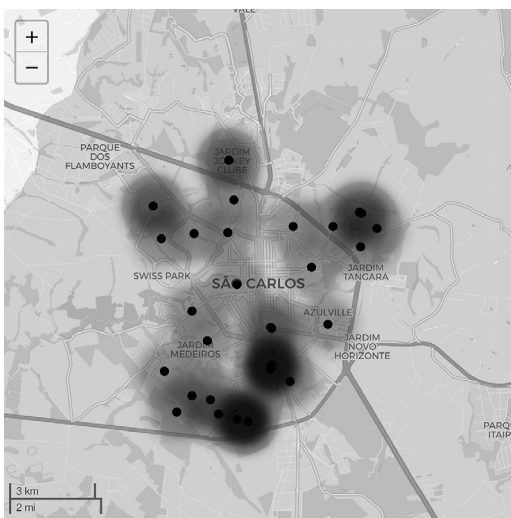


Figura 2. Distribución de las instalaciones de atención primaria de salud en São Carlos-SP.

Fuente: Autores.

Otros estudios de caso

GeoCNES también se probó en ciudades de diferentes regiones del país, pero con una población similar a la de São Carlos. Las cuatro ciudades seleccionadas fueron Chapecó – SC (región Sur), Parnamirim – RN (región Nordeste), Rondonópolis – MT (región Centro-Oeste) y Parauapebas – PA (región Norte). En la Tabla 1 se muestran los resultados de la ubicación de las instalaciones como la proporción de habitantes por instalación.

En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos para las cuatro ciudades. La ciudad con el mayor número de instalaciones de nivel APS es Rondonópolis – MT, lo que afecta directamente la proporción de instalaciones por habitante, haciendo de esta ciudad la única (entre las cinco ciudades mencionadas) con una proporción menor a la propuesta del Ministerio de Salud.

Tabla 1. Resultados de ubicación de instalaciones de GeoCNES y proporción de habitantes por instalación.

Ciudad (código del IBGE)	Población	Instalaciones existentes			Instalaciones ubicadas sin errores			Habitantes por Instalación		
		SHC	TCH	PHC	SHC	TCH	PHC	SHC	THC	
São Carlos-SP (3548906)	254,857	36	4	5	35	4	5	7079	63714	50971
Chapecó-SC (4204202)	254,785	28	2	2	26	2	2	9099	127393	127393
Parnamirim-RN (2403251)	252,716	29	1	4	27	1	4	8714	252716	63179
Rondonópolis-MT (5107602)	244,911	66	1	5	58	1	4	3711	244911	48982
Parauapebas-PA (1505536)	267,836	26	1	7	19	1	7	10301	267836	38262

Fuente: Autores.

Considerando las ciudades en las que se probó GeoCNES, un total de 20 instalaciones presentaron algún tipo de error. Estos errores fueron más frecuentes entre las instalaciones de APS, aunque una instalación de nivel terciario también presentó este error. Al investigar la dirección de estas instalaciones, se pudo notar que diecisiete de ellas tenían su número omitido en la dirección. La razón de la información faltante es desconocida, ya que el llenado de estos registros es realizado por empleados de los centros de salud, pero puede ser una señal de algún tipo de error en el proceso de llenado de registros o puede representar situaciones en las que la dirección realmente no contiene ningún número. En cualquier caso, esto refuerza la importancia de la información detallada para

un proceso exitoso de geolocalización basado en la dirección.

Tabla 2 presenta el tiempo requerido para adquirir los datos del CNES. En cuanto al tiempo para recuperar los datos del CNES, los resultados eran los esperados, ya que las ciudades con más instalaciones de salud representan más datos a recuperar. Con relación a este resultado, es interesante observar que el tiempo necesario para recuperar la dirección de los hospitales de Parnamirim – RN fue un valor atípico, lo cual está relacionado con la estabilidad de la conexión del sistema CNES. El tiempo de geocodificación sigue la misma regla, y las consultas con más entradas tardaron más que las menores.

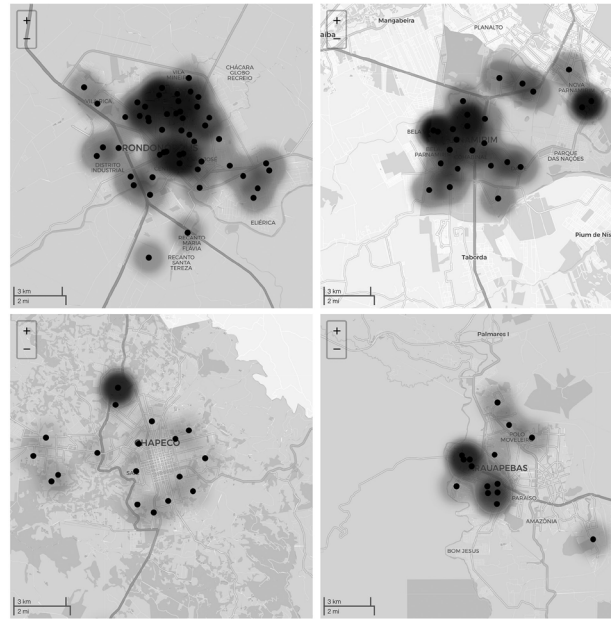


Figura 3. Distribución de las instalaciones de atención primaria de salud en Rondonópolis-MT (arriba a la izquierda), Chapecó-SC (abajo a la izquierda), Parnamirim-RN (arriba a la derecha) y Parauapebas-PA (abajo a la derecha).

Fuente: Autores.

Tabla 2. Tiempo empleado en la consulta de CNES y geocodificación para cada ciudad y nivel de atención.

Ciudad	Instalaciones existentes			Tiempo de consulta de CNES (segundos)			Tiempo de geolocalización (segundos)		
	APS	ASS	ATS	APS	ASS	ATS	APS	ASS	ATS
São Carlos-SP	36	4	5	105.56	11.09	14.97	17.45	2.87	3.43
Chapecó-SC	28	2	2	76.21	5.72	6.41	9.91	1.92	1.90
Parnamirim-RN	29	1	4	74.46	2.45	43.38	9.80	1.40	2.55
Rondonópolis-MT	66	1	5	173.98	2.83	14.80	20.97	1.38	3.17
Parauapebas-PA	26	1	7	70.35	2.63	19.78	8.38	1.57	3.91

Fuente: Autores.

Desafíos, limitaciones y pasos futuras

El principal desafío encontrado durante el desarrollo de GeoCNES está relacionado con las inconsistencias del sistema CNES, que inicialmente parecía ser un problema del geocodificador, pero durante el proceso de investigación y resolución se pudo notar que algunos establecimientos tenían registros incompletos, con números de calle o nombres faltantes, o incluso errores ortográficos. Estas deficiencias a veces hacían que el proceso de geocodificación fuera más difícil e, en algunos casos, imposible.

Rocha *et al.*²¹ han investigado la calidad de la información en la base de datos del CNES, y han encontrado que los datos del CNES presentan numerosas inconsistencias, particularmente en cuanto al número de camas y al estado operativo de los equipos, pero también en la identificación de direcciones. Como consecuencia, el 63% de los hospitales en todo el país se ubicaron dentro de un radio de 1 kilómetro de las direcciones listadas en la base de datos del CNES, y para el 10% de estos, esta distancia podría extenderse hasta 5 kilómetros.

Cabe señalar que, a pesar de superar estos desafíos, hubo un error aleatorio persistente que ocurría cuando GeoCNES intentaba comunicarse con el CNES. Este error ocasionalmente provocaba fallos en la aplicación, deteniendo temporalmente su funcionalidad. Es posible que el sistema CNES se sobrecargue con un alto volumen de consultas en un breve período, lo que lleva a estos errores intermitentes. La solución directa a este problema implica volver a ejecutar el código.

Sin embargo, esta resultó ser la principal limitación de la aplicación, relacionada con la consulta de información de ciudades con un gran número de instalaciones, como São Paulo – SP, una ciudad que tiene 518 instalaciones de atención primaria, y que recurrentemente resultó en fallos cuando se utilizó como entrada. Trabajos futuros podrían investigar las razones de este problema y proponer una manera de evitar este fallo.

Otra limitación identificada está relacionada con la fiabilidad de los datos pre-geolocalizados. La información utilizada como parámetro de entrada para el proceso de geolocalización es proporcionada por la base de datos del CNES, que, como se discutió, puede presentar algunas inconsistencias. Para mejorar el proceso, se podría implementar una validación por parte del usuario que indique a estas instalaciones en las que se encontró algún problema, siendo el usuario el responsable de corregir dichas instalaciones.

Aunque GeoCNES se presenta como una herramienta innovadora para recuperar datos alfanuméricos y convertirlos en información geo-

gráfica, es importante mencionar que ya se han desarrollado herramientas computacionales para asistir intereses multidisciplinarios mediante la conexión a fuentes de datos gubernamentales y la recuperación de diferentes datos para el usuario. Un ejemplo notable es Geobr⁴², un paquete de R y Python que permite la recuperación de datos espaciales oficiales brasileños de diversas fuentes, incluida la infraestructura de salud disponible para el CNES, utilizando un enfoque más generalizado. Además, con un enfoque diferente, también está Microdatasus⁴³, una aplicación que se centra en el análisis analítico y estadístico de microdatos, con menos énfasis en los aspectos espaciales.

GeoCNES surgió dentro del contexto académico de la investigación de posgrado. Concebida inicialmente para abordar la necesidad de un enfoque simplificado y automatizado para obtener las ubicaciones de las instalaciones de salud, ha evolucionado hacia una herramienta más sofisticada con aplicabilidad multidisciplinaria.

El desarrollo de la aplicación sigue en curso y las mejoras futuras se centrarán en refinar los análisis de accesibilidad basados en redes de calles de la ciudad. También se está desarrollando una mejora para identificar la capacidad de las instalaciones de salud (número de médicos y enfermeras) y los servicios ofrecidos.

Actualmente, GeoCNES reside en un repositorio dedicado de GitHub, una plataforma centralizada que facilita el acceso al código fuente del software y fomenta las contribuciones de los usuarios. Esta transparencia asegura la trazabilidad a lo largo del proceso de desarrollo. Una vez que se introduzcan nuevas funcionalidades, el código será actualizado diligentemente.

Consideraciones finales

El crecimiento de las poblaciones urbanas ha incrementado la necesidad de una planificación urbana integral para optimizar la infraestructura y los servicios, asegurando un acceso eficiente para todos los residentes. Este proceso implica analizar datos sobre la distribución de la población, redes de transporte e instalaciones existentes para identificar áreas que requieren nuevas instalaciones o la reubicación de las existentes. Al ubicar cuidadosamente los centros de salud, escuelas y centros de transporte, los planificadores urbanos pueden minimizar los tiempos de viaje y mejorar la calidad de vida de todos los residentes.

Con la intención de contribuir a la solución de estos problemas, GeoCNES se propone como una herramienta informática amigable y accesible que permite la visualización de la distribución de la infraestructura de salud dentro del

área urbana de cualquier municipio brasileño, independientemente del nivel educativo o la formación del usuario.

Aunque GeoCNETS no profundiza en los aspectos operativos y tipos de servicios ofrecidos en cada establecimiento de salud, su importancia radica en su capacidad para ofrecer un producto que muestra la distribución espacial de las instalaciones de salud.

Para futuros proyectos, se debería considerar adaptar el método a otros lenguajes de programación y expandir sus capacidades para permitir un microanálisis del sistema de salud dentro del municipio en investigación. Además, utilizar la división territorial en sectores censales para correlacionar la distribución espacial de los establecimientos de salud con datos socioeconómicos sería una vía interesante para investigaciones futuras.

Colaboradores

LBM Assis concibió el trabajo, desarrolló y probó el programa, escribió y revisó el texto y aprobó la versión final; FR Moraes desarrolló y probó el programa, escribió y revisó el texto y aprobó la versión final; PCL Segantine supervisó el trabajo, escribió y revisó el texto y aprobó la versión final; MJNP Amado supervisó el trabajo y aprobó la versión final; e I Silva supervisó el trabajo y aprobó la versión final.

Referencias

- Kanuganti S, Sarkar AK, Singh AP. Evaluation of access to health care in rural areas using enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method. *J Transp Geogr* 2016; 56:45-52.
- Guagliardo MF. Spatial accessibility of primary care: concepts, methods and challenges. *Int J Health Geogr* 2004; 3(1):3.
- Reinhardt U, Cheng T. The world health report 2000 – health systems: improving performance. *Bull World Health Organ.* 2000;78(8):1064.
- Pan American Health Organization (PAHO). Redes integradas de servicios de salud: conceptos, opciones de política y hoja de ruta para su implementación en las Américas [Internet]. 2010. [accedido 2023 jun 11]. Disponible en: <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/31323/9789275331163-spa.PDF>
- Dantas MNP, Souza DLB, Souza AMG, Aiquoc KM, Souza TA, Barbosa IR. Factors associated with poor access to health services in Brazil. *Rev Bras Epidemiol* 2021; 24:e210004.
- United Nations Human Settlements Programme. World Cities Report 2022 [Internet]. 2022. [cited 2023 jun 11]. Available from: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210028592c011>
- United Nations (UN). Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages [Internet]. 2021. [cited 2024 fev 6]. Available from: https://sdgs.un.org/goals/goal3#progress_and_info
- Santos FDA, Gurgel Júnior GD, Gurgel IGD, Pacheco HF, Bezerra AFB. A definição de prioridade de investimento em saúde: uma análise a partir da participação dos atores na tomada de decisão. *Physis* 2015; 25(4):1079-1094.
- Boeing G. The right tools for the job: the case for spatial science tool-building. *Trans GIS* 2020; 24(5):1299-1314.
- Piccolo DM. Qualidade de dados dos sistemas de informação do Datasus: análise crítica da literatura. *Cienc Info Rev* 2018; 5(3):13-19.
- Assis LBM, Segantine PCL. Proposal of a multicriteria method to implement new primary health care units – a case study in São Carlos-SP. *Rev Bras Cartogr* 2021; 73(4):1071-1085.
- Goudard B, Oliveira FH, Gerente J. Avaliação de modelos de localização para análise da distribuição espacial de Unidades Básicas de Saúde. *Rev Bras Cartogr* 2015; 67(1):15-34.
- Colaço PMPLM. *Crítérios para o planejamento de equipamentos de saúde: análise de caso de estudo no contexto urbano da AML* [dissertação]. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa; 2011.
- Guida C, Carpentieri G, Masoumi H. Measuring spatial accessibility to urban services for older adults: an application to healthcare facilities in Milan. *Eur Transp Res Rev* 2022; 14(1):23.
- Boeing G, Higgs C, Liu S, Giles-Corti B, Sallis JF, Cerin E, Lowe M, Adlakha D, Hinckson E, Moudon AV, Salvo D, Adams MA, Barrozo LV, Bozovic T, Delclòs-Alió X, Dygrýn J, Ferguson S, Gebel K, Ho TP, Lai PC, Martori JC, Nitvimol K, Queralt A, Roberts JD, Sambo GH, Schipperijn J, Vale D, Van de Weghe N, Vich G, Arundel J. Using open data and open-source software to develop spatial indicators of urban design and transport features for achieving healthy and sustainable cities. *Lancet Glob Heal* 2022; 10(6):e907-e918.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. 2018 revision of the world urbanization prospects [Internet]. 2018. [cited 2023 dez 2]. Available from: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Methodology.pdf>
- Dreux VP. *Uma avaliação da legislação urbanística na provisão de equipamentos urbanos, serviços e áreas de lazer em conjuntos habitacionais* [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2004.
- Moraes AF. *Análise dos processos de definição utilizados pelas prefeituras, para o local de implantação de Equipamentos Urbanos Comunitários (EUCs), em municípios do estado de Santa Catarina* [tese]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2013.
- Lowe M, Adlakha D, Sallis JF, Salvo D, Cerin E, Moudon AV, Higgs C, Hinckson E, Arundel J, Boeing G, Liu S, Mansour P, Gebel K, Puig-Ribera A, Mishra PB, Bozovic T, Carson J, Dygrýn J, Florindo AA, Ho TP, Hook H, Hunter RF, Lai PC, Molina-García J, Nitvimol K, Oyeyemi AL, Ramos CDG, Resendiz E, Troelsen J, Witlox F, Giles-Corti B. City planning policies to support health and sustainability: an international comparison of policy indicators for 25 cities. *Lancet Glob Heal* 2022; 10(6):e-882-e894.
- Brasil. Ministério da Saúde (MS). *DataSUS – Trajetória 1991-2002*. Brasília: MS: 2002.
- Rocha TAH, Da Silva NC, Barbosa ACQ, Amaral PV, Thumé E, Rocha JV, Alvares V, Facchini LA. Cadastro nacional de estabelecimentos de saúde: Evidências sobre a confiabilidade dos dados. *Cien Saude Colet* 2018; 23(1):229-240.
- Brasil. Ministério da Saúde (MS). Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde [Internet]. 2024. [acessado 2024 abr 15]. Disponível em: <https://cnes.datasus.gov.br/>
- ESRI. What is geocoding? [Internet]. 2016. [cited 2023 dez 20]. Available from: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guide-books/geocoding/what-is-geocoding.htm>
- ISO. ISO 19157:2023 - Geographic information - Data quality. 2023. p. 102.
- Whitsel EA, Rose KM, Wood JL, Henley AC, Liao D, Heiss G. Accuracy and repeatability of commercial geocoding. *Am J Epidemiol* 2004; 160(10):1023-1029.
- Bandil A, Girdhar V, Dincer K, Govind H, Cao P, Song A, Ali M. An interactive system to compare, explore and identify discrepancies across map providers [Internet]. 2020. [cited 2023 out 13]. Available from: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3397536.3422348>
- Moraes FR. *Proposta de um modelo genérico de um SBDE que permita a interoperabilidade entre sistemas* [tese]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2017.

28. Präger M, Kurz C, Böhm J, Laxy M, Maier W. Using data from online geocoding services for the assessment of environmental obesogenic factors: a feasibility study. *Int J Health Geogr* 2019; 18(1):13.
29. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Códigos dos municípios IBGE [Internet]. 2024. [acessado 2024 jan 10]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/codigos-dos-municipios.php>
30. Brasil. Ministério da Saúde (MS). Categoria: Nova Classificação de Tipos de Estabelecimento [Internet]. 2020. [acessado 2024 jan 10]. Disponível: https://wiki.saude.gov.br/cnes/index.php/Categoria:Nova_Classificacao_de_Tipos_de_Estabelecimento
31. Bakshi R, Knoblock CA, Thakkar S. Exploiting online sources to accurately geocode addresses [Internet]. 2004. [cited 2024 jan 10]. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1032222.1032251>
32. Geopy. Geocoders [Internet]. 2023. [cited 2023 mar 6]. Available from: <https://geopy.readthedocs.io/en/stable/#>
33. Teske D. Geocoder accuracy ranking. In: Lamprecht AL, Margaria T, editors. *Process design for natural scientists. communications in computer and information science*. Berlin: Springer; 2014. p. 161-174.
34. Google. Geocoding API [Internet]. 2023. [cited 2023 mar 6]. Available from: <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/>
35. OpenStreetMaps. Nominatim API [Internet]. 2023. [cited 2023 mar 6]. Available from: <https://nominatim.org/release-docs/develop/api/Overview/>
36. Microsoft. Bing Maps Locations API [Internet]. 2023. [cited 2023 mar 6]. Available from: <https://learn.microsoft.com/en-us/bingmaps/rest-services/locations/?redirectedfrom=MSDN>
37. ESRI. Geocoding service [Internet]. 2023. [cited 2023 mar 6]. Available from: <https://developers.arcgis.com/rest/geocode/api-reference/overview-world-geocoding-service.htm>
38. Clemens K. Enhanced address search with spelling variants [Internet]. 2018. [cited 2024 jan 10]. Available from: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006646100280035>
39. Das RD, Purves RS. Exploring the potential of Twitter to understand traffic events and their locations in Greater Mumbai, India. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2020; 21(12):5213-5222.
40. Serere HN, Resch B, Havas CR. Enhanced geocoding precision for location inference of tweet text using spaCy, Nominatim and Google Maps. A comparative analysis of the influence of data selection. *PLoS One* 2023; 18(3):e0282942.
41. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades e Estados [Internet]. 2022. [acessado 2022 dez 11]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>
42. Pereira R, Gonçalves C. geobr: Download official spatial data sets of Brazil [Internet]. 2023. [cited 2023 dez 11]. Available from: <https://github.com/ipeaGIT/geobr>
43. Saldanha RDF, Bastos RR, Barcellos C. Microdatas: A package for downloading and preprocessing microdata from Brazilian Health Informatics Department (DATASUS). *Cad Saude Publica* 2019; 35(9):e00032419.

Artículo presentado en 13/03/2024

Aprobado en 17/04/2024

Versión final presentada en 19/04/2024

Editores jefes: Maria Cecília de Souza Minayo, Romeu Gomes, Antônio Augusto Moura da Silva