



Análisis global de la dinámica del sistema de bicicletas compartidas de la Ciudad de Medellín "EnCicla"

Global analysis of the dynamic bicycles shared system of the Medellin city "EnCicla"

Daniel Soto Forero

Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
anderson.soto@udea.edu.co

Alexis Rodriguez

Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
aenrique.rodriguez@udea.edu.co

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.09.18.004>

Recibido: Enero 14, 2021
Aceptado: Marzo 26, 2021

Resumen: Los sistemas de bicicletas compartidas en la literatura se conocen como BSS por sus siglas en inglés (*Bike Shared System*), en este artículo se analiza el BSS de la ciudad de Medellín - Colombia llamado "EnCicla". El objetivo es conocer el comportamiento global del sistema para poder identificar las horas de mayor uso, las estaciones más usadas y los tipos de comportamiento que se presentan. Se han recolectado datos del funcionamiento del sistema, con los cuales se ha realizado el procesamiento y análisis categorizado por ubicación y franjas horarias. Con los datos recolectados y el análisis estadístico realizado se identificaron las estaciones críticas dentro del sistema, los patrones de comportamiento de las cada una de ellas, los picos horarios, los máximos, mínimos y variabilidad de ocupación en promedio; con lo cual se genera el desafío de modelar, simular y mejorar el funcionamiento del sistema, así como evaluar políticas de operación y su implementación.

Palabras clave: *Sistemas de Bicicletas Compartidas, Análisis de Información, Sistemas de Transporte, Sistemas Dinámicos.*

Abstract: In this article we analyze the BSS of the city of Medellin - Colombia called "EnCicla". The objective is to know the overall behavior of the system to be able to identify the most used hours, the most used stations and the types of behavior that occur. Data on the operation of the system has been collected, with which processing and analysis has been carried out categorized by location and time slots. With the data collected and the statistical analysis performed identified the critical stations within the system, the patterns of behavior of each of them, the peak hours, the maximum, minimum and variability of occupancy on average; which generates the challenge to model, simulate and improve the functioning of the system, as well as evaluating operating policies and its implementation.

Keywords: *Byke Shared System, Information Analysis, Transport Systems, Dynamical Systems.*

1. Introducción

En este artículo se analizan los datos extraídos del sistema de bicicletas compartidas (BSS) EnCicla como se hace en [1], es decir estructurar los datos e identificar factores relevantes de la dinámica de operación para posteriormente poder estimar con mayor precisión la demanda en días, franjas horarias y zonas, una vez realizado el análisis es más factible plantear e implementar un modelo y a partir de dicho modelo realizar una simulación con el objetivo de realizar la optimización un poco más precisa del funcionamiento global del sistema, aunque hay otros enfoques de análisis como en [2] donde el objetivo es examinar los recorridos de los usuarios e identificar los patrones y las tendencias o en [3] donde el punto central además de los trayectos es la caracterización de los usuarios por edades y género. Los análisis de BSS pueden ser con algoritmos de aprendizaje automático o con métodos probabilísticos [4], en este artículo se usan métodos probabilísticos para poder estimar posteriormente la ocupación de las estaciones y la demanda de los usuarios.

Los sistemas de bicicletas compartidas son un servicio de movilidad que está constituido por múltiples bicicletas, un conjunto de estaciones distribuidas a lo largo de la ciudad y un sistema manual o automático de gestión [5], en algunos casos las bicicletas poseen tecnologías de geolocalización. El objetivo es prestar a los ciudadanos las bicicletas para facilitarles la movilidad por la ciudad. [6]. Muchas ciudades alrededor del mundo han adoptado BSS, el servicio permite tomar prestada una bicicleta o dejarla aparcada en una de las estaciones que se encuentran a lo largo de la ciudad [7], generalmente el préstamo se realiza por poco tiempo [6].

Los BSS han ayudado a la movilidad dentro de las grandes ciudades y presentan otras grandes ventajas como el mejoramiento de la calidad de vida dentro de la ciudad, mejor experiencia en el uso de los espacios públicos e impactos medioambientales positivos [7]. Un importante factor de éxito es que reúne diferentes requerimientos de los usuarios, además una bicicleta es un medio de transporte económico y sostenible [8].

Existen múltiples barreras para la puesta en marcha de BSS como mala elección de tecnología, control de costos, mantenimiento, capacidad, factores culturales [8], aspectos de seguridad, procesos operativos [6]. Muchos de estos problemas han sido tratados aplicando políticas sobre componentes específicos como: seguridad, calidad, accesibilidad y derechos de los usuarios [9].

Uno de los principales problemas que limitan la puesta en marcha y operación de los BSS es la estimación de la demanda potencial y reposicionamiento [8]. Con respecto a dicha problemática, se han identificado dos líneas principales, el reposicionamiento estático (*offline*) y el reposicionamiento dinámico (*online*) [5], como propuesta de solución al problema estático se encuentran diversos modelos como: programación entera considerando las horas de mayor uso y las horas en las cuales el sistema no presta servicio [1], algoritmos evolutivos híbridos que inicialmente y basados en 10 variables predefinidas intentan predecir la demanda entrenando un modelo con datos históricos [10], programación binaria agrupando las estaciones según las zonas de la ciudad y asignando prioridades individuales para cada estación [5] o métodos quasi-Montecarlo estimando la demanda a través de métodos de regresión y considerando variables de infraestructura y meteorológicas [11], un algoritmo genético híbrido que modifica la búsqueda adicionando diversidad adaptativa en los individuos y que intenta resolver el problema considerando una flota de bicicletas heterogéneas [12], además de intentar resolver el problema del reposicionamiento también se tienen en cuenta las emisiones de CO₂ que producen el consumo de combustible de los vehículos que realizan el reposicionamiento así como las bicicletas que están en un estado que no permite prestar el servicio y consumen espacio y recursos [13]. Estos trabajos proponen soluciones directas y no analizan previamente el comportamiento global del sistema como proponen los trabajos [1] donde se analizan los datos de uso del sistema con el fin de identificar las horas de mayor demanda y focalizar el algoritmo de programación entera en esas franjas horarias, y en [4] donde los autores pretenden comprender la complejidad del sistema antes de proponer un algoritmo específico como solución, allí analizan el sistema globalmente con la información recolectada por 30 días; con la información resultante del análisis se puede reducir el espacio de búsqueda o focalizar el algoritmo específico propuesto a un conjunto de estaciones con mayor variabilidad o demanda y así hacer que el algoritmo propuesto sea más eficiente e incluso llegue a encontrar soluciones más óptimas en menor tiempo de cómputo [4].

Este artículo se compone de 3 secciones. La sección 2 describe los datos con los que se ha trabajado, su origen, su estructura y el pre-tratamiento realizado para llevar a cabo el análisis. La sección 3 presenta los resultados obtenidos, los descubrimientos y su descripción, así como los valores y las gráficas estadísticas. Finalmente, las conclusiones, donde se especifica la relevancia de los resultados obtenidos en el problema de reposicionamiento de BSS.

2. Materiales y métodos

Específicamente en la ciudad de Medellín, dado que el gobierno de la ciudad promueve la movilidad no motorizada y económica debido a la complejidad global del sistema de transportes, surge en el 2010 el sistema de bicicletas públicas (BSS), llamado EnCicla, el sistema nace como un proyecto de grado de 3 estudiantes de Ingeniería de Diseño de Producto de la Universidad EAFIT y tiene por objetivo encontrar soluciones a algunos de los retos de movilidad en la ciudad. El sistema comenzó a operar en agosto de 2012 [14]. Su uso es gratuito y opera de lunes a viernes de 5:30 a.m a 10:00 p.m. y sábados de 6:30 a.m. a 9:00 p.m. Para obtener el préstamo de las bicicletas es indispensable realizar exitosamente el proceso de registro e inscripción al Sistema a través de la página web [15]. Actualmente, el Sistema EnCicla dispone de 77 estaciones divididas en 7 zonas; 13 de las estaciones están integradas a otros sistemas de transporte de la ciudad [15].

Para trabajar con información estandarizada y datos fiables, se utilizaron los datos de las 69 estaciones que han estado operando normalmente durante el tiempo de recolección de los datos y contienen información completa, la lista de estas estaciones aparece en la Tabla 1, la zona corresponde al sector (N – Norte, S – Sur, O – Occidente y C - Centro) donde está ubicada la estación según la Figura 1.

Tabla 1. Estaciones consideradas en el análisis realizado.

ID estación	Nombre	Zona	ID estación	Nombre	Zona
1	Moravia	N	46	María Mulata	O
2	Universidad	N	47	Circular Primera	O
3	Ruta N	N	48	Batallón	O
4	Punto Cero	N	49	Pedro Nel Gómez	O
5	Universidad Nacional	N	51	Cacique Candela	O
6	Colombia	O	53	Florida Nueva	O
7	Suramericana	O	54	Primavera	S
8	Estadio	O	55	SIU - UdeA	C
9	San Juan	O	56	Industriales Metro	S
10	UPB	O	57	Nutibara	S
11	Los Colores	O	58	Parque San Joaquín	O
12	Floresta	O	59	Río Aburrá	S
13	Robledo	N	60	Villa Carlota	S
19	Plaza de la Libertad	C	61	Ciudad del Río	S
20	Parque de los Mangos	O	62	Otra Banda	O

21	La 33	<i>S</i>	63	Palacé	<i>C</i>
22	Primer Parque de Laureles	<i>O</i>	64	MAMM	<i>S</i>
23	Rosales	<i>S</i>	65	Juan Pablo II	<i>S</i>
24	Maria Luisa Calle	<i>S</i>	66	Industriales Metroplús	<i>S</i>
27	Sabaneta Parque	<i>S</i>	67	Museo de Antioquia	<i>C</i>
28	Sabaneta Metro	<i>S</i>	70	Campus Nacional	<i>N</i>
32	San Pedro y San Pablo	<i>O</i>	89	Málaga	<i>C</i>
33	Pies Descalzos I	<i>C</i>	91	Teledellín	<i>S</i>
34	Área Metropolitana	<i>C</i>	92	Parques del Río	<i>S</i>
35	Plaza Mayor	<i>C</i>	93	Salazar y Herrera	<i>O</i>
36	Parque de las Luces I	<i>C</i>	94	Calle 19A Villa Carlota	<i>S</i>
37	Pies Descalzos II	<i>C</i>	95	San Antonio	<i>C</i>
38	Segundo Parque de Laureles	<i>O</i>	96	Parque Berrio	<i>C</i>
39	San Joaquín	<i>O</i>	97	Palacio de la Cultura	<i>C</i>
40	Orquídeas	<i>O</i>	98	Picacha la 76	<i>S</i>
41	Parque de las Luces II	<i>C</i>	99	Unicentro	<i>S</i>
42	Santa Teresita	<i>O</i>	100	Bulerias	<i>S</i>
43	Cisneros - Unaula	<i>C</i>	101	Cafetero	<i>S</i>
44	La 65	<i>O</i>	102	Distrito Creativo	<i>C</i>
45	Unidad Deportiva de Belén	<i>S</i>			

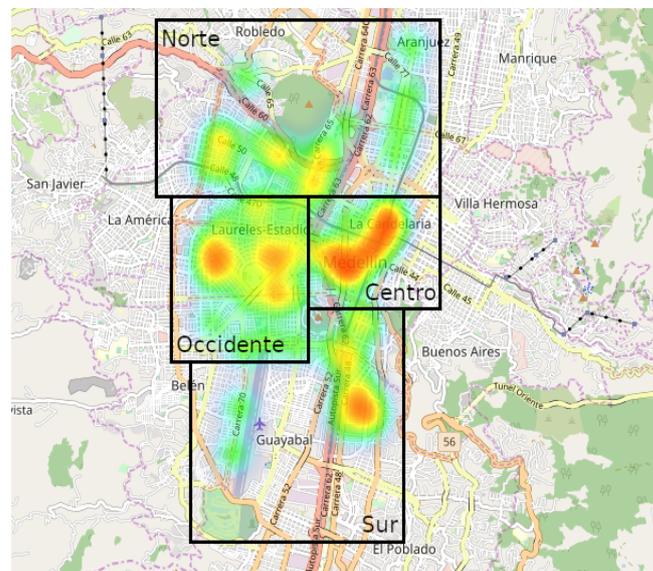


Figura 1. Densidad de estaciones en la ciudad de Medellín en las regiones asignadas.

Los datos han sido recolectados a través de un script Python que captura de la página de EnCicla [15] el estado del sistema cada 10 minutos. El script genera por cada captura un archivo llamado AAAA-MM-DD_hh-mm.txt (donde AAAA representa el año, MM el mes, DD el día, hh la hora y mm los minutos), el archivo tiene formato JSON cuya estructura se muestra en la Figura 2.

```

{ "date":1573093191 ,
  "stations":[
    { "id": "1" ,
      "name": "Zona 1" ,
      "desc": "Comuna 4 – Aranjuez" ,
      "items": [
        { "id": 1 ,
          "order":0 ,
          "name": "Moravia" ,
          "address": "CALLE 82A # 52 -29" ,
          "description": "Moravia" ,
          "lat": "6.276584999999999" ,
          "lon": " - 75.564803999999995" ,
          "type": "manual" ,
          "capacity":15 ,
          "bikes":103 ,
          "places": null ,
          "picture": "moravia.jpg" ,
          "bikes_state":0 ,
          "places_state": "danger" ,
          "closed":0
        }
      ]
    }
  ]
}

```

Figura 2. Estructura JSON de los datos capturados.

Donde aparece la fecha de obtención de la información en formato *Epoch* y la información de las estaciones de forma jerárquica, las zonas que componen el sistema con identificador, nombre, una breve descripción y un vector de las estaciones que pertenecen a dicha zona. Como información de cada estación hay un identificador, el orden de estación dentro de la zona, el nombre, la dirección, una breve descripción, la ubicación en longitud - latitud, el tipo de estación por mecanismo de funcionamiento, la capacidad total de la estación, el número de bicicletas disponibles en el momento de obtención de la información, el número de espacios vacíos disponibles, el nombre de un archivo que contiene la imagen de la estación, el estado global de las bicicletas en la estación y un indicador del estado del servicio. Para las estaciones de tipo manual, los parámetros *capacity* y *places* no se utilizan.

2.1. Pre-tratamiento de los Datos

Se han capturado 4959 archivos que representan la información de 48 días. Los datos han sido extraídos de los archivos generados usando un script Python con un *parser* JSON que los envía a una base de datos PostgreSQL cuya estructura se muestra en la Figura 3. A partir de ahí se ha realizado el análisis usando lenguaje SQL.

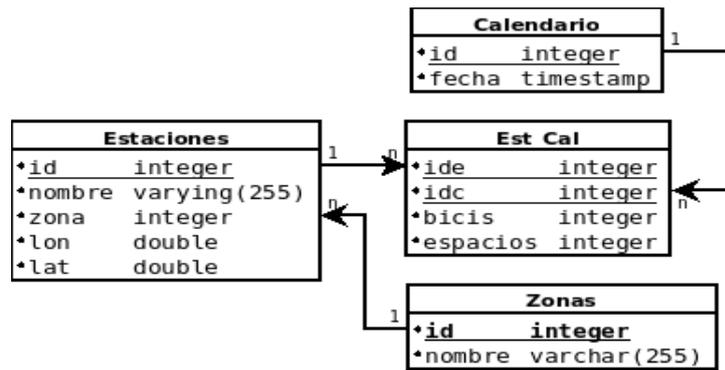


Figura 3. Diagrama de la base de datos generada para el análisis de la información.

2.2. Análisis estadístico de los datos

Se utilizaron medidas de promedio, mínimo, máximo y desviación estándar. Los cálculos y gráficas estadísticas, así como las gráficas de densidad fueron realizados usando consultas SQL sobre la base de datos PostgreSQL y las funciones incorporadas al programa informático GNU Octave, las imágenes de georeferenciación se obtuvieron con Openstreetmap.

3. Resultados

Una vez que se ha preprocesado y consolidado la información en la base de datos, se ha analizado de forma global el comportamiento, mediante gráficas e indicadores calculados.

Dos factores que facilitan el análisis y permiten contextualizar e interpretar los resultados son las zonas o regiones como se divide la ciudad geográficamente y la densidad de estaciones en dichas zonas, para el caso de estudio estos factores pueden verse en la Figura 1. Las estaciones están distribuidas a lo largo de la ciudad de Medellín, con una mayor concentración en la región centro (San Antonio, Alpujarra y La Candelaria), sur (Villa carlota) y occidente (Laureles). Para la división realizada y las 69 estaciones consideradas en el análisis, la densidad es: 10.14% en la zona norte (N), 34.78% en la zona occidente (O), 23.18% en la zona centro (C) y 31.88% en la zona sur (S).

La ocupación en promedio de las estaciones durante el periodo de recolección de datos permite ver la variabilidad, la mediana, los valores mínimo y máximo, así como los valores extremos. En la Figura 4 se ve que las estaciones 2, 7, 8 y 12 son las que estadísticamente están más ocupadas y presentan mayor dispersión, puede ser porque son estaciones cercanas a universidades y centros deportivos entonces ahí bastante flujo y muy variable de personas. Las demás estaciones presentan valores de ocupación y dispersión similares.

La dinámica global de uso del sistema Figura 5, presenta un comportamiento de ocupación de las estaciones oscilante, por cada día se describe una curva en U , excepto los días de no servicio como el intervalo entre 272 y 378 (11 de Noviembre, día festivo). La curva no es tan pronunciada los días en los cuales se presentan conflictos en la ciudad como en el intervalo entre 1150 y 1250 (21 de Noviembre, día de protestas en la ciudad). El sistema en la mayoría de los días "normales" presenta un mayor uso entre las 17:10 y 17:40, el menor uso del sistema aparece en las horas cercanas a los límites de no operación.

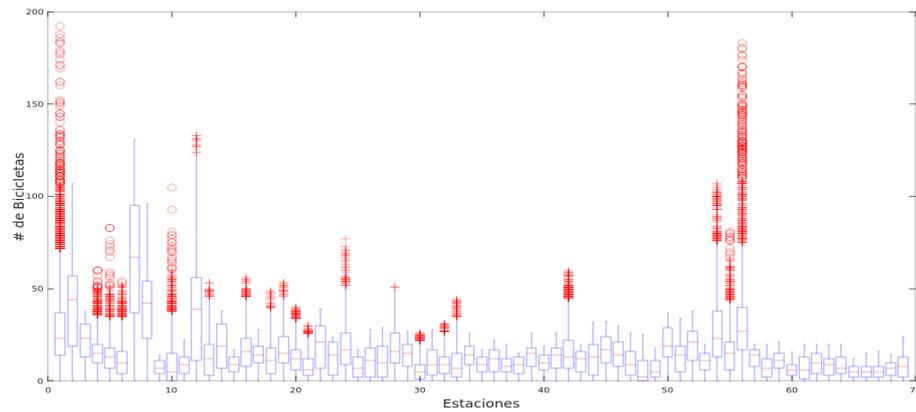


Figura 4. Variabilidad del número de bicicletas en cada estación en el periodo de los datos.

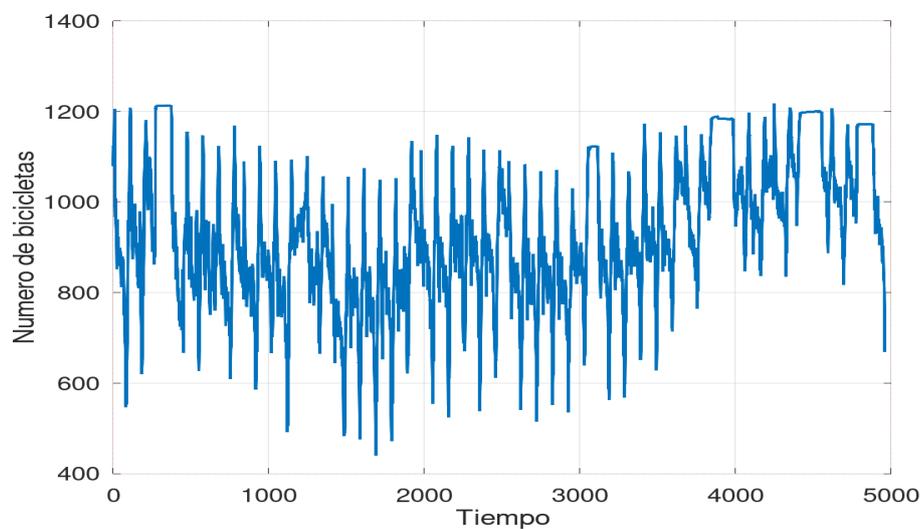


Figura 5. Promedio del total de bicicletas en las estaciones en el periodo de datos recolectado.

Con los datos obtenidos se han identificado tipos de comportamiento de ocupación de las estaciones en promedio, los tipos encontrados son: *UA* – En forma de *U* ascendente, en donde el número de bicicletas en la estación comienza a disminuir hasta un determinado punto en donde comienza a ascender y finaliza el día con un mayor número de bicicletas que con el que comenzó. *U* - En forma de *U*, en donde el número de bicicletas en la estación comienza a disminuir hasta un determinado punto en donde comienza a ascender y finaliza el día con un número cercano al número de bicicletas con el que comenzó. *O* - Oscilante, presenta altos y bajos durante el día y generalmente finaliza el día con un número cercano al número de bicicletas con el que comenzó. *UI* - En forma de *U* inversa, comienza en forma ascendente luego desciende y finaliza el día con un número cercano al número de bicicletas con el que comenzó. *UD* - En forma de *U* descendente, en donde el número de bicicletas en la estación comienza a disminuir hasta un determinado punto en donde comienza a ascender y finaliza el día con un menor número de bicicletas que con el que comenzó. Un ejemplo de cada tipo de comportamiento extraído de los datos se puede ver en la Figura 6.

La ocupación global promedio de las estaciones por horas Figura 7, permite ver en escala de colores la regularidad y los picos de ocupación a lo largo del día. Según la tabla 2 se encontró que en total hay 5 *UA* (7.24%), 29 *U* (42.02%), 20 *UI* (28.98%), 1 *UD* (1.45%) y 14 *O* (20.28%). Las estaciones cuyo comportamiento es más difícil de predecir son las marcadas con tipo oscilante. Las estaciones de tipo *U*, *UA* y *UD* pueden presentar ese comportamiento por el hecho de que son estaciones próximas a complejos habitacionales y las estaciones de tipo

UI se encuentran próximas a centros de estudio o trabajo. Se puede ver que el desbalance se concentra en promedio en el 28.97% del sistema

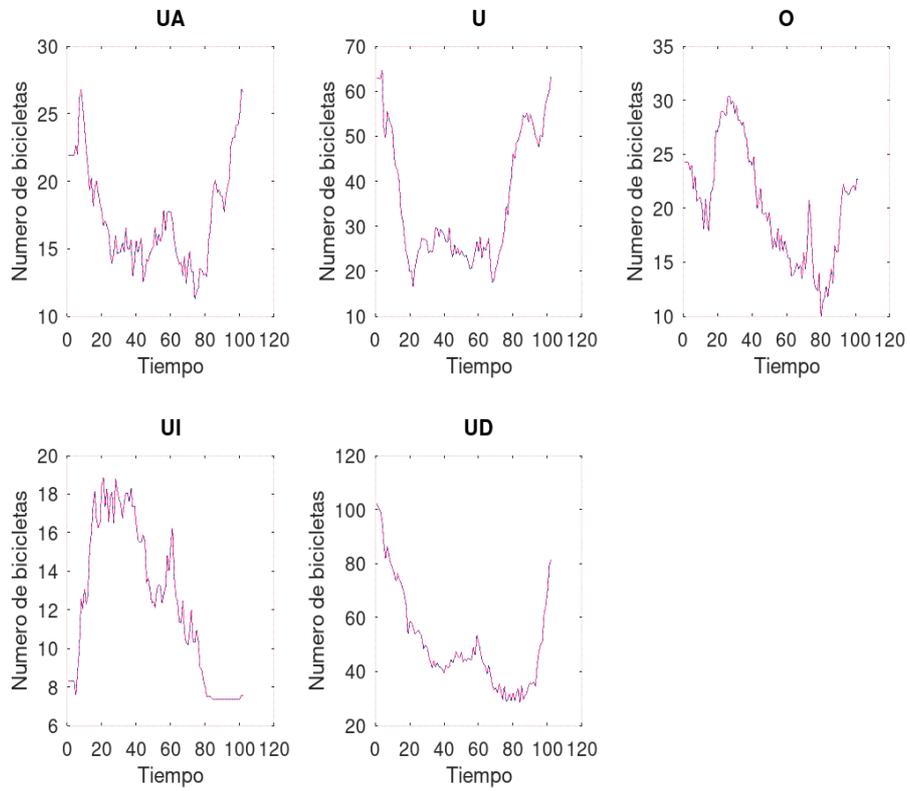


Figura 6. Tipos de comportamiento identificados.

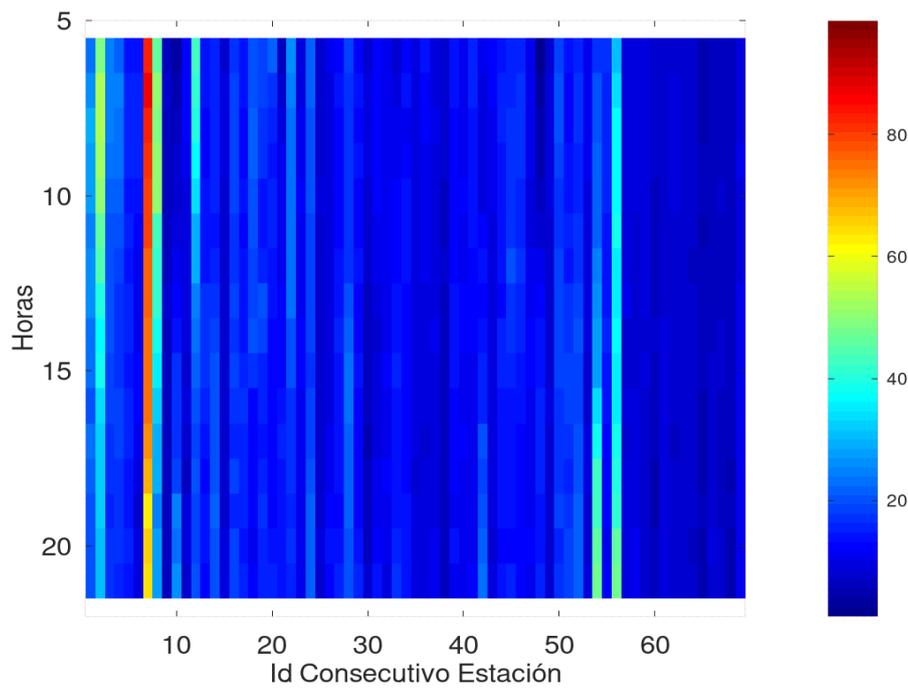


Figura 7. Promedio de bicicletas en cada una de las estaciones en el periodo de datos recolectados.

Para realizar el balance off-line es importante conocer las estaciones que necesitan un alto número de bicicletas en las horas de la mañana, cercanas a la hora de apertura, en promedio son las estaciones Universidad, Suramericana, Estadio, San Juan, Sabaneta Parque, Santa Teresita, Maria Mulata, Nutibara, Parque San Joaquín, Juan Pablo II y Salazar y Herrera. También hay que garantizar que las estaciones que pertenecen al tipo *UI* tengan espacios disponibles en las horas cercanas a su punto máximo. Las estaciones con alta varianza como Moravia, Suramericana y Floresta representan estaciones en donde el flujo de bicicletas cambia constantemente y en altas cantidades, pudiendo pasar de un alto número de bicicletas a un número bajo o viceversa en poco tiempo, por lo cual allí es necesario que el sistema automático sea robusto y soporte altos niveles de uso y disponibilidad. Según la Figura 6 las estaciones en donde en promedio se pueden encontrar más bicicletas son Moravia, Universidad, Suramericana, Estadio, Floresta e Industriales Metroplús.

La Tabla 2 muestra por cada estación, en promedio el mínimo número de bicicletas y la hora en donde es más probable que se presenta esa mínima ocupación, así como el máximo número de bicicletas y la hora correspondiente, el tipo de estación según su comportamiento y la variabilidad de la ocupación.

Tabla 2. Características calculadas de las estaciones sobre el promedio de ocupación y la totalidad de los datos recolectados.

ID	Min	Hora Min	Max	Hora Máx	Var	Tipo
1	8,04	10 : 20	88,39	19 : 40	633,69	UA
2	15,59	14 : 10	68,46	5 : 20	261,94	U
3	6,65	11 : 20	34,57	20 : 20	86,55	U
4	5,80	17 : 20	29,91	21 : 50	63,76	UA
5	3,15	18 : 00	25,20	10 : 10	50,80	O
6	2,20	8 : 10	30,06	18 : 40	57,83	O
7	29,48	19 : 00	105,39	5 : 10	478,75	UD
8	13,74	8 : 40	67,93	5 : 40	309,78	U
9	1,06	7 : 50	12,19	5 : 10	12,00	U
10	0,15	5 : 10	33,37	8 : 40	100,56	UI
11	1,67	13 : 20	16,78	18 : 30	23,01	U
12	8,67	8 : 20	83,94	20 : 10	628,33	UA
13	1,96	18 : 20	31,69	12 : 00	73,65	O
19	4,02	13 : 30	34,83	21 : 30	104,36	U
20	2,17	10 : 10	14,30	16 : 50	13,49	O
21	4,98	18 : 50	28,80	13 : 50	53,00	O
22	5,63	18 : 40	19,65	13 : 10	16,94	U
23	2,15	15 : 40	29,28	6 : 30	63,01	U
24	5,17	17 : 10	29,57	22 : 00	55,26	U
27	3,96	16 : 00	24,17	5 : 50	27,52	O
28	0,78	19 : 00	17,04	7 : 50	27,01	O
32	7,67	17 : 50	31,00	6 : 00	58,25	U
33	2,24	6 : 00	22,56	22 : 00	51,67	UI

34	4,76	18 : 20	33,80	9 : 30	88,00	O
35	2,54	17 : 00	13,76	6 : 00	16,69	O
36	1,61	6 : 50	24,93	15 : 50	66,40	UI
37	2,19	12 : 30	23,61	7 : 20	53,41	U
38	6,00	18 : 00	28,94	7 : 40	48,11	O
39	2,72	20 : 10	23,98	5 : 30	48,04	U
40	1,26	7 : 50	13,63	21 : 30	15,32	U
41	1,28	7 : 00	25,43	16 : 00	62,05	UI
42	2,39	18 : 20	16,44	5 : 10	23,36	U
43	2,70	19 : 00	24,31	8 : 30	47,16	UI
44	3,74	6 : 30	22,20	21 : 50	31,56	U
45	2,19	16 : 10	14,50	8 : 20	15,44	U
46	2,31	13 : 50	19,20	5 : 10	32,38	U
47	1,63	17 : 50	15,80	22 : 00	18,56	U
48	1,52	8 : 00	13,81	20 : 30	16,79	U
49	4,59	17 : 50	21,48	21 : 00	29,14	UA
51	2,59	18 : 00	15,15	7 : 10	17,84	U
53	5,57	17 : 50	19,54	6 : 00	17,83	U
54	2,94	18 : 30	32,96	10 : 10	138,00	UI
55	3,37	8 : 20	16,74	21 : 30	22,37	U
56	2,43	10 : 30	25,98	21 : 40	56,75	U
57	3,44	19 : 20	26,74	5 : 10	51,52	U
58	3,65	10 : 00	24,41	5 : 30	43,07	U
59	2,04	20 : 20	19,81	16 : 40	31,90	UI
60	0,24	5 : 10	19,57	8 : 30	51,47	UI
61	2,70	7 : 30	11,94	9 : 50	11,22	O
62	8,50	17 : 30	31,31	22 : 00	43,09	U
63	1,96	20 : 00	26,65	11 : 40	62,28	UI
64	3,48	19 : 20	33,15	8 : 40	81,95	UI
65	2,70	11 : 10	17,69	5 : 10	21,23	U
66	5,19	5 : 50	56,04	8 : 50	299,98	UI
67	3,48	7 : 40	33,57	15 : 30	84,27	UI
70	11,80	17 : 50	57,87	11 : 20	401,96	UI
89	2,69	7 : 20	17,56	15 : 50	25,84	UI
91	0,83	19 : 40	15,52	11 : 40	25,19	UI

92	5,41	8 : 10	14,96	20 : 40	9,09	U
93	2,20	8 : 10	11,78	5 : 10	10,36	U
94	1,44	17 : 50	13,78	10 : 30	19,99	UI
95	2,19	5 : 50	17,19	17 : 30	26,18	UI
96	1,70	20 : 30	14,39	18 : 40	18,64	UI
97	1,46	8 : 00	16,28	18 : 10	21,02	U
98	0,78	11 : 50	9,80	18 : 40	8,84	O
99	0,69	19 : 10	11,54	9 : 10	14,81	UI
100	0,59	18 : 30	10,78	9 : 20	11,46	UI
101	2,52	17 : 20	9,83	13 : 30	5,85	O
102	1,81	20 : 00	14,98	9 : 00	19,60	UI

La Figura 8 muestra que las estaciones de la región central presentan mayor ocupación entre las 10:00 y las 18:00, en la región sur la mayor ocupación se presenta entre las 5:00 y 16:00, en la región occidente hay mayor ocupación de 5:00 a 14:00 y de 20:00 a 22:00, la región norte es más estable y no presenta variaciones significativas a lo largo del día.

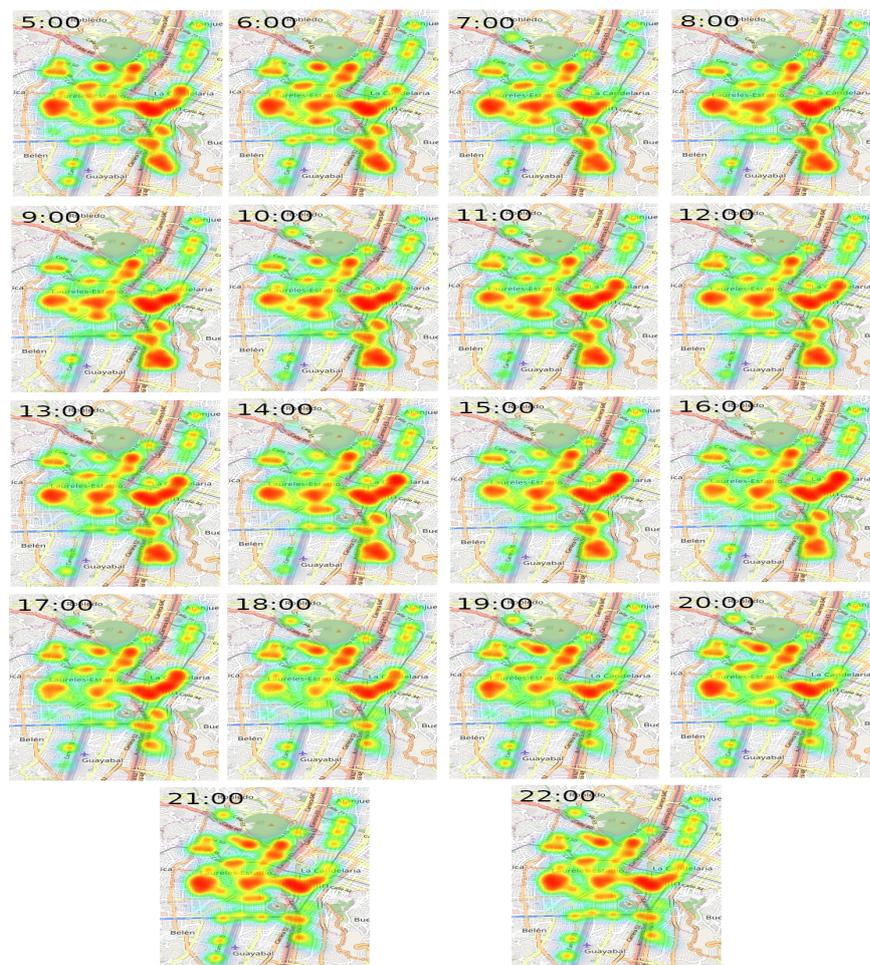


Figura 8. Distribución promedio de bicicletas en las estaciones por horas.

4. Conclusiones

Los datos muestran que el comportamiento global del sistema es regular salvo las pocas excepciones vistas en algunas estaciones. Con el análisis global realizado se conocen las variaciones estadísticas del sistema que ha permitido identificar las estaciones críticas en términos de cantidad de préstamos; se han identificado las horas importantes para la prestación del servicio, así como las zonas de congestión de la ciudad; además se han agrupado y caracterizado los patrones de comportamiento individual de las estaciones; se ha podido inferir de forma indirecta el comportamiento del flujo de transporte en la ciudad. Todo esto ayuda a conocer el sistema y mejorar su funcionamiento para responder a la demanda de los usuarios, ya que la mayoría de trabajos encontrados intentan resolver el problema de reposicionamiento de forma directa sin realizar el análisis previo. Los hallazgos permiten la aplicación de un algoritmo de optimización más focalizado en las estaciones de mayor demanda como las estaciones de la región occidente o por tipo de estación como *O*, *UA* o *UD* y en las franjas horarias que presentan mayor variabilidad como entre las 10:00 y 18:00 horas para las estaciones de la zona centro.

Como trabajos futuros se puede determinar si para el óptimo funcionamiento del sistema es necesario realizar un reposicionamiento estático (*offline*) en cuyo caso se estimaría la cantidad de bicicletas necesarias en cada estación en la hora de apertura y la ruta más corta para realizar dicha redistribución, o dinámico (*online*) en donde se puede obtener una estimación con el análisis realizado que permite generar una distribución de probabilidad discreta para cada estación y franja horaria con lo cual se calcula la ruta más corta con restricción de ventanas de tiempo en función del número de bicicletas estimado por la distribución de probabilidad generada como un método no paramétrico. También es posible con la información obtenida del análisis implementar una simulación base con distribuciones de probabilidad no paramétricas por cada estación, cuyo comportamiento sea similar al sistema real para a partir de allí evaluar el impacto de políticas de funcionamiento o modificación de la infraestructura del sistema o la ciudad.

5. Referencias

- [1] O'Mahony, E., Shmoys, D. (2015). Data Analysis and Optimization for (Citi)Bike Sharing. Trabajo presentado en *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Austin, Texas.
- [2] Caulfield, B., O'Mahony, M., Brazil, W., Weldon, P. (2017). Examining usage patterns of a bike-sharing scheme in a medium sized city. *Transportation Research Part A Policy and Practice*, 100, 152-161. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.04.023>
- [3] Sanmiguel-Rodríguez, A. (2019). Análisis de las edades, trayectos y minutos de uso en la utilización de un sistema de bicicletas compartidas: el caso del VaiBike en Vilagarcía de Arousa (España). *Retos. Nuevas Tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, (35), 314-319. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6761701>
- [4] Feng, Y., Costa Affonso, R., Zolghadri, M. (2017). Analysis of bike sharing system by clustering: the Vélib' case. *IFAC-PapersOnline*, 50 (1), 12422-12427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2430>
- [5] Arroyave Guerrero, M. A. (2017). *Diseño de estrategias para el reposicionamiento de unidades en Sistemas Públicos de Bicicleta* (Tesis de Maestría). Universidad de Antioquia, Colombia.
- [6] Fishman, E. (2015). Bikeshare: A Review of Recent Literature. *Transport Reviews*, 36 (1), 92-113. doi: <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1033036>
- [7] Frade, I., Ribeiro, A. (2014). Bicycle sharing systems demand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 518-527. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.085>
- [8] Moro, S., Imhof, A., Fettermann, D., Cauchick-Miguel, P. (2018). Barriers to bicycle sharing systems implementation: analysis of two unsuccessful PSS. *Procedia CIRP*, 73, 191-196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.312>
- [9] Quintero González, J. R. (2017). Bicicletas compartidas como sistema de transporte público urbano: análisis de políticas públicas en Colombia (1989-2017). *Revista Ciudades, Estados y Política*, 4 (3), 17-35. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revcep/article/view/66296>
- [10] Gao, X., Lee, G. (2019). Moment-based rental prediction for bicycle-sharing transportation systems using a hybrid genetic algorithm and machine learning. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 60-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.023>

- [11] Reynaud, F., Faghih-Imani, A., Eluru, N. (2018). Modelling bicycle availability in bicycle sharing systems: A case study from Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 43, 32-40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.018>
- [12] Li, Y., Szeto, W. Y., Long, J., Shui, C. S. (2016). A multiple type bike repositioning problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 90, 263-278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.05.010>
- [13] Wang, Y., Szeto, W. Y. (2018) Static green repositioning in bike sharing systems with broken bikes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 438-457. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.016>
- [14] Bejarano, M., Ceballos, L., Maya, J. (2017). A user-centred assessment of a new bicycle sharing system in Medellin. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 44, 145-158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.11.004>
- [15] EnCicla. (2020). *Sistema de Bicicletas Públicas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Recuperado de: <http://encicla.metropol.gov.co>