

Ajuste preciso entre oferta y demanda para la explotación ferroviaria de tipo transporte público en las nuevas ciudades periféricas, desde la perspectiva del círculo de desplazamientos cotidianos

— El caso de la línea Chengdu–Pujiang

XU Lei, LIU Bing, WANG Fangkai

Resumen. El desarrollo de nuevas ciudades periféricas constituye un instrumento fundamental de la estrategia china de nueva urbanización. Con el fin de facilitar su integración en el círculo de desplazamientos cotidianos de la ciudad central mediante una explotación ferroviaria de tipo transporte público y de mejorar el nivel de servicio, este artículo propone un marco de evaluación y formulación estratégica basado en el «ajuste preciso entre oferta y demanda». El estudio empírico se centra en la línea Chengdu–Pujiang, que conecta el área central de Chengdu con la nueva ciudad periférica de Chongzhou. Mediante el análisis integrado de datos procedentes de múltiples fuentes, se identifican primero el volumen total de viajes pendulares y los modos de transporte entre Chongzhou y el centro de Chengdu. A continuación, se examinan de forma detallada las características de los viajeros ferroviarios y se evalúa el ajuste de la oferta en cuatro dimensiones: horarios, capacidad, funcionamiento de la estación y conexiones. El análisis detecta varias inadecuaciones: escasez de servicios en hora punta, reducida flexibilidad de las composiciones, procedimientos complejos de control y billete y ausencia de autobuses nocturnos de conexión. Desde una perspectiva de optimización de toda la cadena de viaje, se formulan estrategias de ajuste preciso y se resumen cuatro orientaciones: centrar la actuación en la demanda, elevar la eficiencia de toda la cadena, garantizar una adaptación dinámica e innovar para mejorar la calidad. La investigación aporta nuevos fundamentos metodológicos para la construcción de círculos de desplazamientos cotidianos y para la mejora de la explotación ferroviaria de tipo transporte público en las grandes metrópolis.

Palabras clave: explotación ferroviaria de tipo transporte público; ajuste oferta-demanda; círculo de desplazamientos cotidianos; nueva ciudad periférica; línea Chengdu–Pujiang.

Clasificación de la Biblioteca China: TU984. Código de documento: A. DOI: 10.16361/j.upf.202405008.

Número de artículo: 1000-3363 (2024) 05-0055-09.

* Proyecto general de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China: «Patrones espaciales y estrategias de optimización de corredores TOD ferroviarios desde la perspectiva del equilibrio de flujos: el caso de la región metropolitana de Shanghái» (n.º 52178052); proyecto 2024 de cooperación universidad-industria del Ministerio de Educación, promovido por Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., Ltd.: «Estudio de caso sobre la elaboración de planes de transporte público mediante tecnologías digitales» (n.º 231100155192902).

1 Necesidades de desarrollo de los círculos de desplazamientos cotidianos y de la explotación ferroviaria de tipo transporte público en las nuevas ciudades periféricas

1.1 El círculo ferroviario de desplazamientos de una hora como apoyo esencial de las regiones metropolitanas modernas

Una región metropolitana es una forma espacial de urbanización organizada, dentro de una aglomeración, alrededor de una megaciudad o de una gran ciudad con una fuerte capacidad de irradiación, y cuyo ámbito básico corresponde a un círculo de desplazamientos cotidianos de una hora^①. Las nuevas

ciudades periféricas constituyen una parte importante de esta estructura. Desempeñan un papel clave en la mejora de la estrategia china de urbanización y en la promoción de un desarrollo policéntrico y agrupado. Durante el XIV Plan Quinquenal, Pekín, Shanghái y Chengdu, entre otras grandes ciudades, publicaron políticas de apoyo a su desarrollo②.

En los últimos años, la construcción de círculos de desplazamientos como instrumento para orientar el desarrollo metropolitano y de las nuevas ciudades se ha convertido en un tema destacado [1-2]. Han aumentado notablemente los estudios sobre su alcance y las características espacio-temporales de las actividades. Chai Yanwei et al. [3] distinguen tres modelos de organización espacial: centro urbano, periferia próxima y periferia lejana. Guo Liang et al. [4] utilizan macrodatos móviles para identificar el círculo de desplazamientos del centro de Wuhan y medir su estructura en capas, su composición interna y su morfología exterior. Wu Yimin et al. [5] identifican, mediante indicadores como la tasa de desplazamiento, los principales distritos próximos a Pekín integrados en su círculo y proponen corredores, subgrupos y modelos transfronterizos. Paralelamente, han crecido rápidamente las investigaciones sobre la «región metropolitana sobre raíles», centradas sobre todo en la relación entre transporte ferroviario urbano y región metropolitana [6-9]. También se ha estudiado el papel del ferrocarril en la construcción de estos círculos; Wang Deli [10] propone medidas en cuatro dimensiones —estructura espacial, apoyo del transporte, orientación funcional y mecanismos de garantía— para que el ferrocarril regional y suburbano estructure el círculo de una hora de las grandes ciudades.

1.2 La explotación ferroviaria de tipo transporte público como medida clave para integrar las nuevas ciudades en la red espacial regional

Para favorecer de manera efectiva la concentración de población y funciones en las nuevas ciudades y su integración en el círculo de la ciudad central, resulta esencial construir un sistema de transporte cómodo y eficiente [11]. En febrero de 2019, las Orientaciones de la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma para la formación y el desarrollo de regiones metropolitanas modernas reclamaron «construir círculos de desplazamientos estructurados por el transporte ferroviario, desarrollar enérgicamente los ferrocarriles regionales y suburbanos y utilizar prioritariamente los recursos existentes para operar trenes regionales y suburbanos». En diciembre de 2021, el Plan de desarrollo del sistema moderno de transporte integrado para el XIV Plan Quinquenal precisó que debía «utilizarse activamente la red ferroviaria principal y las líneas interurbanas para prestar servicios pendulares, aumentar el número y la frecuencia de paradas en los principales polos de demanda, fomentar una explotación de tipo transporte público en hora punta y mejorar la calidad del servicio».

Desde el XVIII Congreso del Partido Comunista de China, el crecimiento de las aglomeraciones y las regiones metropolitanas ha incrementado de forma notable la demanda de desplazamientos a distintas escalas. La explotación ferroviaria de tipo transporte público ha recibido una atención creciente y ha dado lugar a numerosas experiencias en Pekín–Tianjin–Hebei, el delta del Yangtsé, la Gran Bahía Guangdong–Hong Kong–Macao y Chengdu–Chongqing (tabla 1). Históricamente, su función ha evolucionado desde un servicio interurbano punto a punto orientado a los viajes de negocios hacia un servicio pendular multinivel y multifuncional.

Al maximizar la densidad de trenes, simplificar la compra de billetes y facilitar el embarque, este modelo busca una experiencia próxima a la del transporte urbano —«llegar y salir casi de inmediato»— y aumenta considerablemente el atractivo del ferrocarril. Para una nueva ciudad periférica, permite establecer una conexión eficiente con el centro sin grandes inversiones en nueva infraestructura, y proporciona a los viajeros puntualidad y comodidad. La línea Jinshan de Shanghái, primera línea china explotada bajo este

principio para conectar una nueva ciudad periférica con el centro urbano, pasó durante sus primeros diez años, desde 2012, de 15 a 37,5 pares de trenes diarios y de 13.000 a 32.000 viajeros al día^③.

Tabla 1. Proyectos existentes de explotación ferroviaria de tipo transporte público en China y su clasificación

Región	Año	Proyecto	Nivel espacial servido	Motivo principal
Pekín– Tianjin– Hebei	2008	Trenes interurbanos Pekín–Tianjin	Entre ciudades centrales	Negocios
Pekín– Tianjin– Hebei	2023	Anillo noreste del ferrocarril suburbano de Pekín	Centro de la ciudad central– nueva ciudad periférica	Desplazamiento cotidiano
Delta del Yangtsé	2012	Línea Jinshan de Shanghái	Centro de la ciudad central– nueva ciudad periférica	Desplazamiento cotidiano
Delta del Yangtsé	2017	Trenes interurbanos Ningbo–Yuyao	Centro de la ciudad central– nueva ciudad periférica	Desplazamiento cotidiano
Delta del Yangtsé	2022	Línea Lianyungang– Huai’an–Yangzhou– Zhenjiang	Entre ciudades periféricas	Negocios
Gran Bahía Guangdong– Hong Kong– Macao	2021	Interurbanos Guangzhou–Qingyuan y anillo oriental de Guangzhou	Ciudad central–ciudad periférica	Negocios
Gran Bahía Guangdong– Hong Kong– Macao	2022	LGV Ganzhou– Shenzhen	Ciudad central–ciudad periférica	Negocios
Chengdu– Chongqing	2010	Línea Chengdu– Dujiangyan	Centro de la ciudad central– nueva ciudad periférica	Desplazamiento cotidiano
Chengdu– Chongqing	2017	Explotación de tipo transporte público Chengdu–Deyang	Ciudad central–ciudad periférica	Negocios
Chengdu– Chongqing	2022	Anillo noroeste de Chongqing	Entre nuevas ciudades periféricas	Desplazamiento cotidiano

Región	Año	Proyecto	Nivel espacial servido	Motivo principal
Otras regiones	2021	Interurbano Changsha–Zhuzhou–Xiangtan	Ciudad central–ciudad periférica	Negocios
Otras regiones	2021	Interurbano Zhengzhou–Kaifeng–Jiaozuo	Ciudad central–ciudad periférica	Negocios
Otras regiones	2023	Línea turística del anillo occidental de Hainan explotada en modo transporte público	Ciudad central–ciudad periférica	Turismo

1.3 Los servicios ferroviarios de las nuevas ciudades deben mejorar su ajuste a la demanda

Con el desarrollo de las tecnologías de integración de redes ferroviarias, la explotación de tipo transporte público ofrece un gran potencial para incorporar las nuevas ciudades periféricas al círculo de la ciudad central —proceso denominado en adelante «integración en el círculo»—. Las investigaciones existentes pueden agruparse en dos vertientes. Desde la demanda, utilizan matrices origen-destino ferroviarias [12], señalización móvil [13] y encuestas a pasajeros [14] para caracterizar a los viajeros, segmentar grupos y prever flujos. Desde la oferta, identifican cuellos de botella en las distintas fases y proponen mejorar el control de seguridad y la validación [15], la organización de las circulaciones [16], el sistema tarifario [17] o el modelo de gestión [18].

En los últimos años, la creciente heterogeneidad de los viajeros integrados en el círculo [19] ha impulsado la evaluación de los factores que condicionan su demanda [20-21] y la adaptación más precisa de los servicios. Se han estudiado especialmente tres dimensiones. Primero, el ajuste «estación a estación», mediante horarios y planes de parada optimizados para satisfacer la demanda de cada estación [22]. Segundo, el ajuste entre el domicilio o lugar de trabajo y la estación, mejorando la accesibilidad de las conexiones a partir de la distribución de empleos y viviendas [23]. Tercero, el ajuste del confort, puesto que la excesiva ocupación reduce el bienestar [24] y limita el aprovechamiento del tiempo de viaje [25].

En un contexto de crecimiento de los desplazamientos metropolitanos, la clave consiste en identificar con precisión la demanda de integración en el círculo y ofrecer un servicio ferroviario adecuado. Aunque los estudios han pasado de analizar por separado la oferta o la demanda a coordinar ambas, todavía falta un marco integral de evaluación del ajuste. Persiste así cierta desconexión entre el análisis de la demanda y la formulación de estrategias. Las restricciones rígidas —horas de entrada y salida del trabajo y duración máxima aceptable del trayecto— siguen estando insuficientemente consideradas, al igual que las exigencias de confort. Por ello resulta difícil alcanzar una adaptación verdaderamente precisa.

En este contexto, la investigación toma como objeto la línea Chengdu–Pujiang, que conecta el centro de Chengdu con la nueva ciudad de Chongzhou. Desde la perspectiva del desplazamiento de integración en el

círculo, utiliza datos multisource para analizar el ajuste preciso entre la demanda pendular y la oferta ferroviaria y formula medidas específicas, con el fin de contribuir a la investigación y la práctica en China.

2 Métodos de investigación y fuentes de datos

2.1 Presentación del caso

En 2023, el comité municipal del Partido y el gobierno de Chengdu exigieron «acelerar la construcción de círculos de desplazamientos eficientes para las nuevas ciudades periféricas». Chongzhou, una de las nuevas ciudades prioritarias, debía «mejorar con rapidez el nivel de explotación de tipo transporte público de la línea Chengdu–Pujiang para facilitar los viajes pendulares con el centro de Chengdu». Situada al oeste del municipio, Chongzhou se encuentra a unos 37 km en línea recta de la plaza Tianfu y cuenta con 780.000 residentes permanentes.

La línea Chengdu–Pujiang es la única conexión ferroviaria entre Chongzhou y el centro de Chengdu. Inaugurada en 2018, fue diseñada para 200 km/h, tiene 99 km de longitud y 11 estaciones (figura 1). Desde su conexión en 2022 con la línea circular del nodo ferroviario de Chengdu, Chongzhou dispone de servicios directos a Chengdu South y Chengdu East. En comparación con el modelo ferroviario tradicional, algunas instalaciones ya se han adaptado parcialmente a una explotación de tipo transporte público —puertas de andén y trenes CRH6A, entre otras—, pero el ajuste preciso a la demanda pendular todavía presenta un amplio margen de mejora.



Figura 1. Esquema de la línea Chengdu–Pujiang

2.2 Delimitación del ámbito de estudio

El ámbito se delimita a partir de la isócrona ferroviaria de una hora desde la estación Chongzhou^④ (figura 2) y se ajusta según los límites administrativos y la distribución del empleo. El lugar de residencia es el centro urbano de Chongzhou; los lugares de trabajo comprenden los cinco distritos centrales de Chengdu — Jinjiang, Qingyang, Jinniu, Wuhou y Chenghua—, la zona de alta tecnología y el nuevo distrito Tianfu (figura 3).

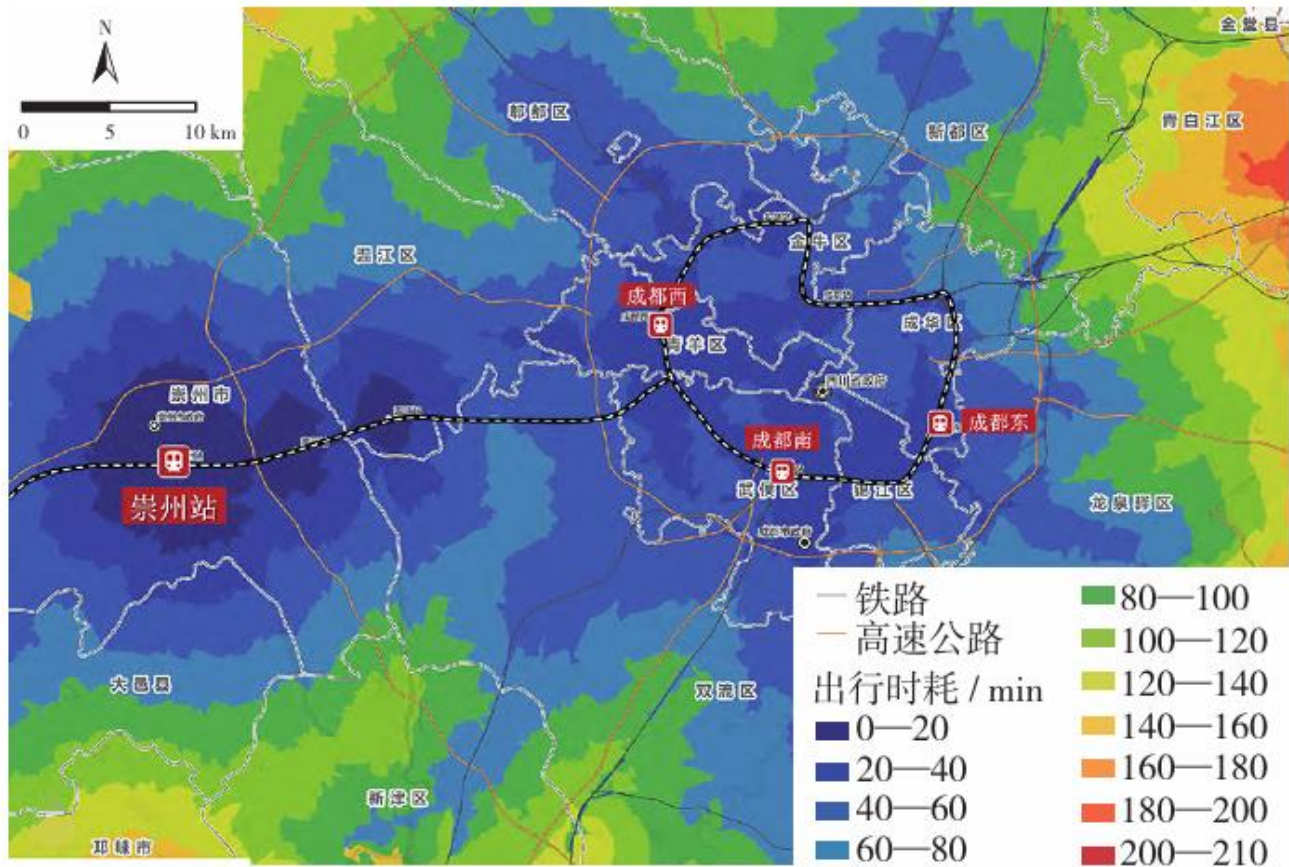


Figura 2. Isócrona ferroviaria desde la estación Chongzhou

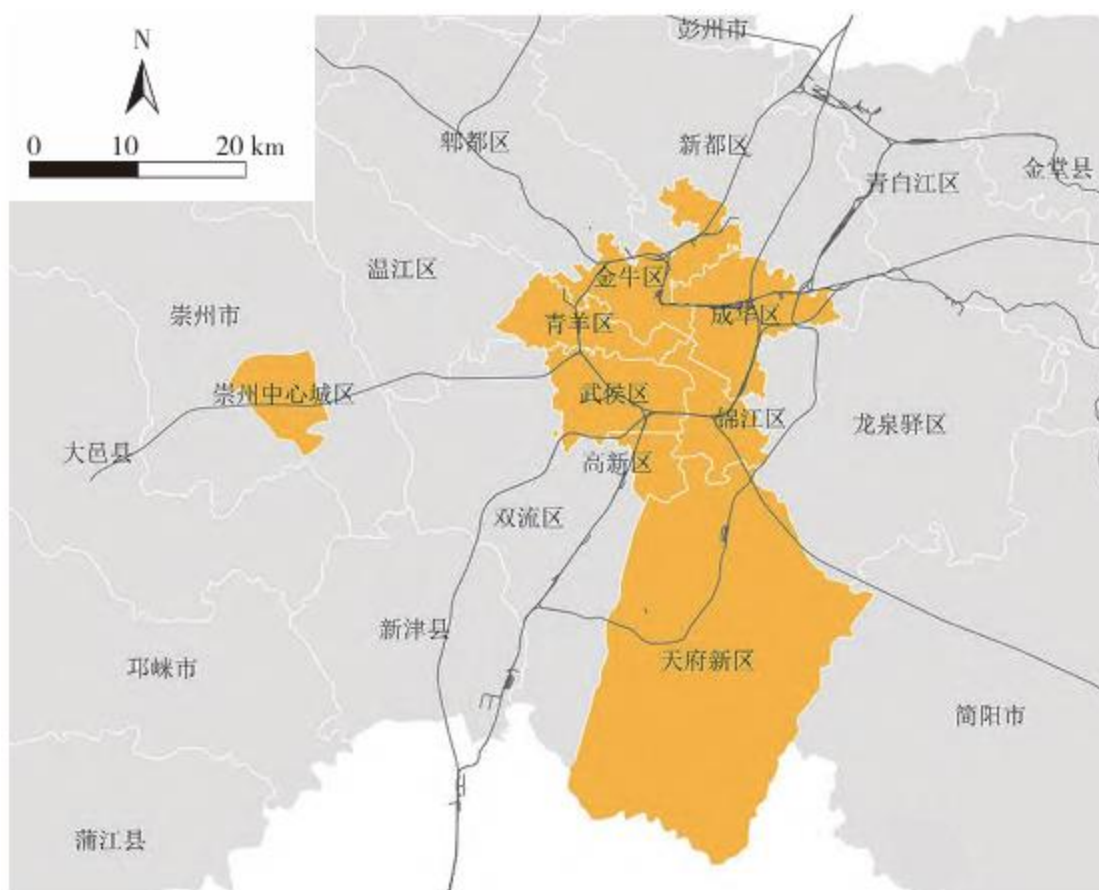


Figura 3. Delimitación del ámbito de estudio

2.3 Método

En primer lugar, mediante datos de múltiples fuentes y análisis de perfiles poblacionales, se identifican el volumen de los flujos entre Chongzhou y el centro de Chengdu, los modos utilizados y las preferencias de los viajeros ferroviarios. En segundo lugar, se combinan los horarios y los datos de venta para analizar el ajuste preciso entre oferta y demanda en cuatro dimensiones: horario, capacidad, estación y conexiones. Los resultados cuantitativos sirven después de base para formular estrategias. La ruta metodológica se muestra en la figura 4.

Considerando la cadena completa de un viaje pendular, se proponen cuatro indicadores para evaluar el nivel de explotación y el grado de satisfacción de la demanda.

(1) Ajuste horario. El análisis incluye todos los trenes que paran o atraviesan Chongzhou e identifica tres categorías con potencial pendular: trenes que paran pero cuyos horarios no permiten llegar puntualmente al trabajo, para los que debe ajustarse la hora de parada; trenes que no paran pero cuyo paso por Chongzhou y llegada al centro son adecuados, para los que puede añadirse una parada; y trenes que paran en Chongzhou pero sirven pocas veces Chengdu West, South o East, para los que conviene aumentar las paradas en el centro.

(2) Ajuste de capacidad. Cuando un tren satisface los requisitos de horario y parada, se analiza su nivel de carga después de salir de Chongzhou para comprobar si la capacidad es suficiente. Se utilizan dos indicadores:

$$\eta_1 = M / S, \quad \eta_2 = M / N$$

η_1 es la tasa de ocupación de asientos: un valor inferior a 1 significa que quedan plazas; un valor igual o superior a 1 indica que todos los asientos están ocupados y que la incomodidad crece con el cociente. η_2 es la tasa de carga: un valor inferior a 1 indica capacidad residual; un valor igual o superior a 1 significa que la carga supera el nivel de servicio admisible. M es el número de viajeros, S el número de asientos y N el número de viajeros correspondiente al nivel de servicio aceptable, fijado en el 70 % de la capacidad nominal según los estándares del transporte público urbano⑤).

(3) Ajuste de la estación. Se descompone el tiempo necesario para todas las fases de entrada y salida de Chongzhou a fin de identificar las etapas prioritarias de reducción: desde el punto de conexión hasta los tornos y desde estos hasta el andén. También se examinan la calidad espacial y los servicios complementarios.

(4) Ajuste de las conexiones. El análisis se centra en los autobuses ordinarios vinculados a Chongzhou, especialmente en su coordinación horaria con los trenes. El indicador es la diferencia entre la llegada del autobús y la salida del tren, o entre la llegada del tren y la salida del autobús. Existe un buen ajuste cuando esa diferencia cubre el tiempo necesario para entrar o salir y conserva cierto margen; una diferencia demasiado grande o demasiado pequeña indica una adaptación insuficiente.

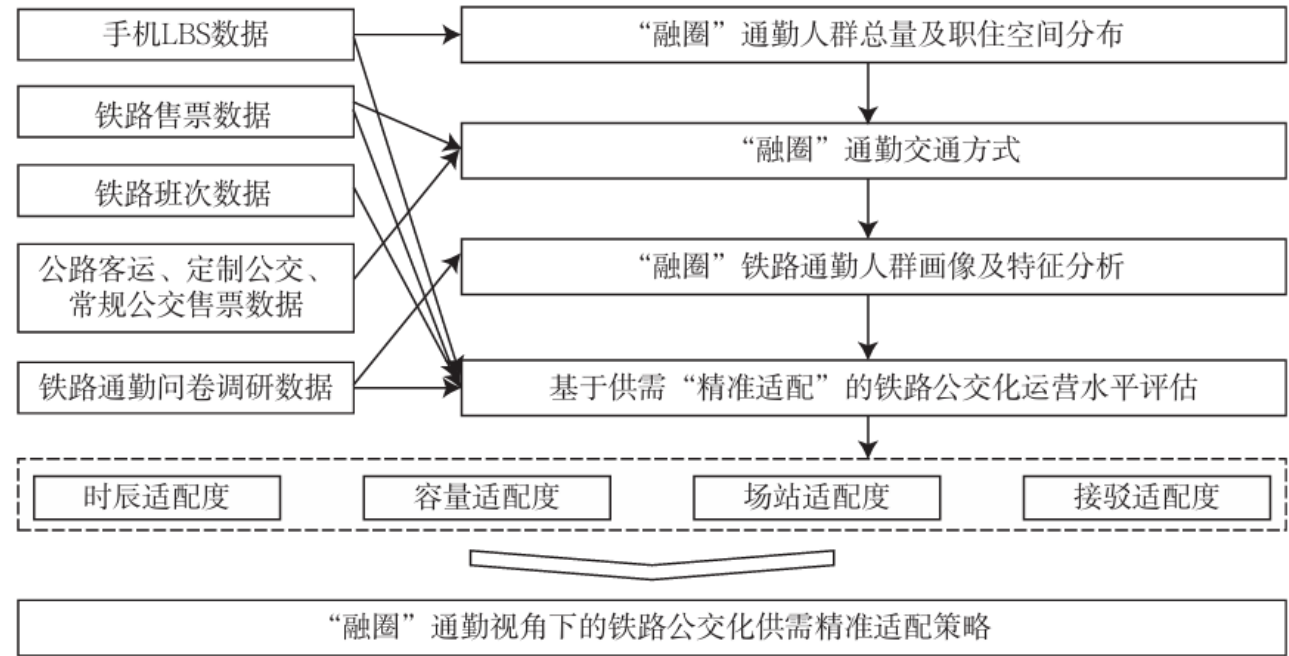


Figura 4. Esquema metodológico de la investigación

2.4 Fuentes de datos

El análisis combina datos móviles, datos de explotación del transporte y una encuesta por cuestionario. Los datos de localización móvil (location-based services, LBS), proporcionados por un operador, cubren la población permanente y flotante activa en el municipio de Chengdu durante abril de 2023. Los datos de billetes ferroviarios, facilitados por la administración ferroviaria, incluyen las matrices origen-destino de todas las estaciones de la línea y los flujos de entrada y salida. Los datos de billetes de autocares y lanzaderas especializadas proceden de los operadores; los flujos de conexión autobús-metro, de la empresa de transporte público. Estos cuatro conjuntos abarcan del 10 al 16 de abril de 2023. Finalmente, se organizó

una encuesta a los viajeros ferroviarios mediante cuestionario en línea y códigos QR en la estación Chongzhou durante las puntas de mañana y tarde; se obtuvieron 2.913 respuestas válidas.

3 Análisis de la demanda de viajes ferroviarios de tipo transporte público para la integración de Chongzhou en el círculo

3.1 Volumen total y estructura modal

A partir de los datos LBS, se identifican como viajeros pendulares las personas que realizan desplazamientos regulares entre orígenes y destinos estables en días laborables. Su lugar de permanencia diurna se considera lugar de trabajo y el nocturno, domicilio. Una extrapolación basada en la tasa de penetración de los datos móviles permite estimar la escala real.

Los viajes de ida y vuelta entre Chongzhou y el centro de Chengdu alcanzan aproximadamente 28.100 desplazamientos por día laborable. El volumen de integración en el círculo en sentido Chongzhou–centro durante la mañana (7:00–9:00) y centro–Chongzhou durante la tarde (17:00–19:00) asciende a 9.633 viajes diarios, equivalentes a unas 4.000–5.000 personas. Por destino, el entorno de Chengdu West, próximo a Chongzhou, concentra el 48 %; Chengdu South, con una elevada concentración de empleos terciarios y comerciales, el 35 %; y Chengdu East, más alejado y con menor concentración de actividades, solo el 17 %.

Se utilizan cinco modos: automóvil particular, tren, lanzadera especializada, autocar y autobús ordinario con transbordo al metro. Salvo el automóvil, los otros cuatro son transportes colectivos. La estimación muestra una estructura dominada por el vehículo privado, complementada por el ferrocarril y varios modos colectivos: el automóvil representa el 63 %, mientras que el tren solo alcanza el 17,1 %, lo que refleja su reducida competitividad relativa (tabla 2).

Tabla 2. Volumen y estructura modal de los desplazamientos de integración en el círculo de Chongzhou en días laborables

Modo	Viajes diarios de ida y vuelta Chongzhou–centro de Chengdu	Viajes pendulares de integración en el círculo	Cuota modal (%)
Tren	4.854	1.646	17,1
Autobús ordinario + metro	4.781	1.320	13,7
Autocar	73	28	0,3
Lanzadera especializada	910	572	5,9
Automóvil particular	17.442	6.066	63,0
Total	28.060	9.633	100,0

Los destinos difieren notablemente según el modo. El tren y el automóvil cubren un territorio más amplio dentro de una duración aceptable y ofrecen más opciones de empleo; por ello se dirigen con mayor

frecuencia a Chengdu South, donde se concentran los puestos de trabajo, con un 48 % y un 44 %, respectivamente. Los autocares y las lanzaderas dependen más de sus itinerarios; el autobús con metro, más lento, se utiliza sobre todo hacia Chengdu West (figura 5).

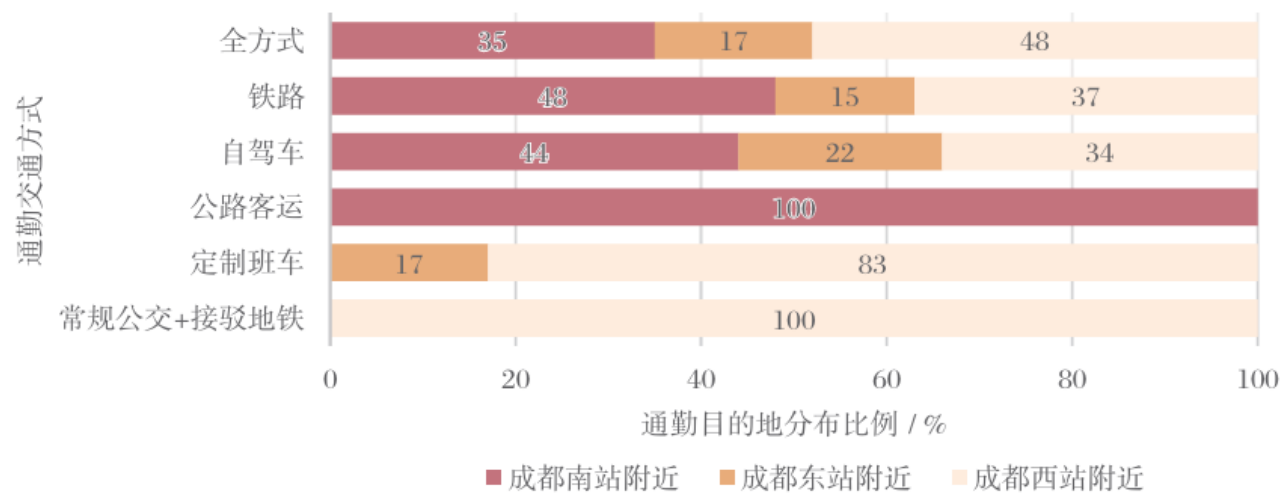


Figura 5. Distribución de los destinos pendulares de Chongzhou y diferencias entre modos en días laborables

3.2 Características de los viajeros ferroviarios de Chongzhou

Las características se analizan mediante la encuesta. El perfil comprende la profesión, los horarios laborales y la duración máxima aceptable de un trayecto simple (figura 6). El análisis de las conexiones incluye el modo y el tiempo desde el domicilio hasta la estación y desde la estación de llegada hasta el trabajo (figura 7).

3.2.1 Perfil: empleo estable, horarios fijos y aceptación de un desplazamiento de una hora

Los viajeros ferroviarios trabajan principalmente en administraciones y en empresas o instituciones públicas; ambos grupos representan el 74 %. Los horarios son relativamente fijos: la entrada se concentra entre las 8:00 y las 9:00 y la salida entre las 17:00 y las 18:00. Más del 85 % acepta una duración máxima inferior a 60 minutos por trayecto.

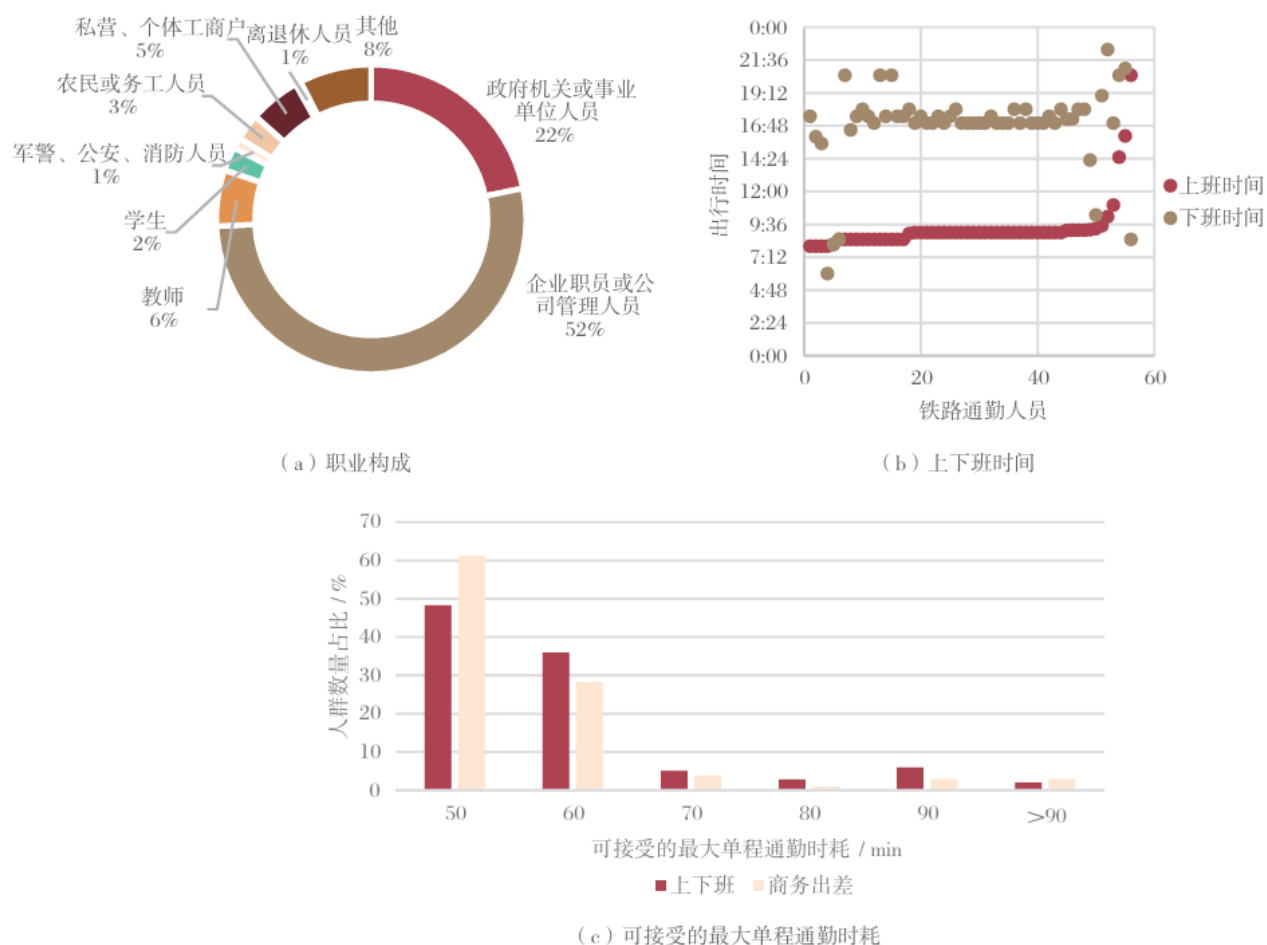


Figura 6. Perfil de los viajeros ferroviarios integrados en el círculo

3.2.2 Características de las conexiones

Modos de conexión. Como Chongzhou no dispone de metro, el acceso a la estación se apoya principalmente en modos motorizados individuales —taxi, vehículo solicitado por aplicación o automóvil privado—, que representan el 51,6 %. El autobús ordinario solo alcanza el 16,1 %. En las tres estaciones del centro de Chengdu domina el metro, con un 55,3 %.

Duración. El tiempo medio de conexión es de 18 minutos en Chongzhou y de 25 minutos en el centro. La proporción de viajes inferiores a 20 minutos es del 66,2 % y del 40,5 %, respectivamente. Según los horarios de la plataforma 12306, los tiempos a bordo entre Chongzhou y Chengdu West, South y East son de 18, 22 y 34 minutos. A la vista de la duración total deseada —menos de 60 minutos—, las conexiones todavía deben optimizarse.

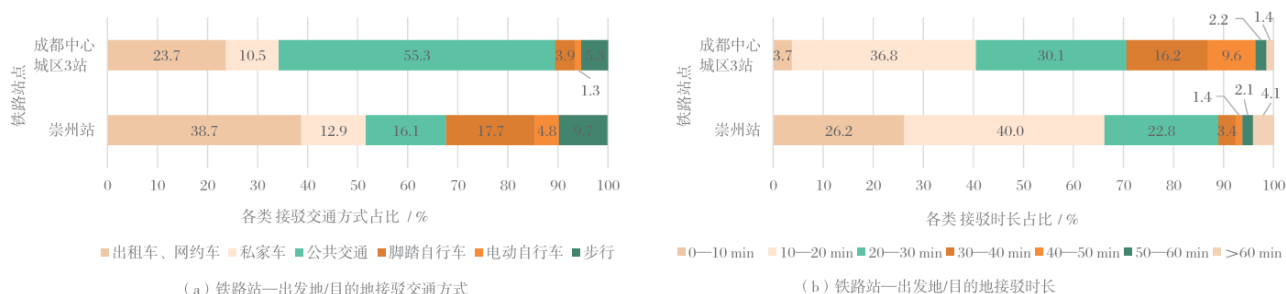


Figura 7. Características de las conexiones en las estaciones

3.3 Evaluación del ajuste de la explotación

3.3.1 Pocos trenes adecuados para los desplazamientos y baja frecuencia

El análisis de los trenes que paran en Chongzhou durante las horas punta revela «primeros trenes demasiado tardíos y servicios vespertinos demasiado espaciados» (tabla 3). Por la mañana, el primer tren hacia el centro es el C3382 (7:58 Chongzhou–8:20 Chengdu South), insuficiente para quienes deben llegar antes de las 8:30. Por la tarde no circula ningún tren entre el D6194 (18:42 Chengdu East, 18:59 Chengdu South–19:22 Chongzhou) y el C3372 (20:15 Chengdu South–20:39 Chongzhou), lo que no satisface a quienes terminan de trabajar entre las 19:00 y las 20:00.

El número de servicios adecuados por la mañana también es escaso: solo uno hacia Chengdu West y ninguno hacia Chengdu East. La línea opera actualmente 100 trenes al día, de los cuales únicamente 46 paran en Chongzhou. Existe, por tanto, un margen considerable para añadir paradas y reforzar las conexiones con las tres estaciones centrales.

Tabla 3. Trenes con parada en Chongzhou adecuados para los desplazamientos de integración en el círculo

Objetivo	Tren	Salida	Llegada
Trabajo por la mañana	C3382	7:58, Chongzhou	8:20, Chengdu South
Trabajo por la mañana	C6602	8:19, Chongzhou	8:37, Chengdu West
Trabajo por la mañana	C3384	8:41, Chongzhou	9:03, Chengdu South
Regreso por la tarde	C3366	17:32, Chengdu South	17:55, Chongzhou
Regreso por la tarde	C6637	18:01, Chengdu West	18:22, Chongzhou
Regreso por la tarde	D6194	18:42, Chengdu East; 18:59, Chengdu South	19:22, Chongzhou
Regreso por la tarde	C3372	20:15, Chengdu South	20:39, Chongzhou
Regreso por la tarde	C3462	21:05, Chengdu East; 21:25, Chengdu South	21:49, Chongzhou
Regreso por la tarde	C6643	21:22, Chengdu West	21:38, Chongzhou
Regreso por la tarde	C3376	22:05, Chengdu South	22:29, Chongzhou

3.3.2 Composición de los trenes poco flexible frente a los flujos

La mayoría de los trenes adecuados está formada por cuatro coches; solo el D6194 tiene ocho (tabla 4). Los datos de venta muestran que las tasas de carga no alcanzan el máximo, pero superan el 80 % en algunos servicios, lo que genera una elevada densidad. Las tasas de ocupación de asientos rebasan habitualmente el 100 %, indicando que la mayoría de los viajeros que suben en Chongzhou debe viajar de pie.

Por la mañana hacia el centro, los tres trenes presentan antes de Chongzhou una tasa de carga inferior al 60 %. El C3382 conserva incluso algunos asientos libres. Después de la subida en Chongzhou, las tasas de ocupación de asientos alcanzan aproximadamente el 150 % y las tasas de carga el 75–80 %, lo que refleja una congestión elevada.

Tabla 4. Análisis de la capacidad residual de los trenes adecuados para los desplazamientos

Sentido	Tren	Coches	Viajeros antes	Viajeros después	Carga antes (%)	Carga después (%)	Asientos antes (%)	Asientos después (%)
Mañana hacia el trabajo	C3382	4	149	384	31	80	60	155
Mañana hacia el trabajo	C6602	4	261	371	54	77	105	150
Mañana hacia el trabajo	C3384	4	278	360	58	75	112	145
Tarde hacia el domicilio	C3366	4	430	267	89	55	173	108
Tarde hacia el domicilio	C6637	4	306	167	64	35	123	67
Tarde hacia el domicilio	D6194	8	517	186	54	19	104	38
Tarde hacia el domicilio	C3372	4	193	87	40	18	78	35
Tarde hacia el domicilio	C3462	4	404	282	84	59	163	114
Tarde hacia el domicilio	C6643	4	207	183	43	38	83	74

Sentido	Tren	Coches	Viajeros antes	Viajeros después	Carga antes (%)	Carga después (%)	Asientos antes (%)	Asientos después (%)
Tarde hacia el domicilio	C3376	4	230	175	48	36	93	71

Nota: los trenes de cuatro y ocho coches disponen, respectivamente, de 248 y 496 asientos, una capacidad máxima de 688 y 1.376 viajeros y una capacidad correspondiente al nivel de servicio aceptable de 481 y 963 viajeros.

3.3.3 Procedimientos complejos de seguridad y validación que prolongan el tiempo en la estación

La descomposición de los tiempos necesarios para entrar y salir (figura 8) muestra que la salida es eficiente, aproximadamente cuatro minutos. La entrada requiere unos once minutos. El principal cuello de botella es la ventana de acceso al andén, estrictamente limitada al intervalo entre once y cinco minutos antes de la salida: los viajeros se concentran brevemente en la validación, lo que reduce considerablemente la fluidez. La separación física entre el control de seguridad y la validación también incrementa la duración y la complejidad.

Los servicios de la estación son además incompletos. No ofrecen suficientes espacios para trabajar, leer, comer algo o comprar a los viajeros que disponen de tiempo de espera, y responden de forma insuficiente a las demandas personalizadas y de calidad.

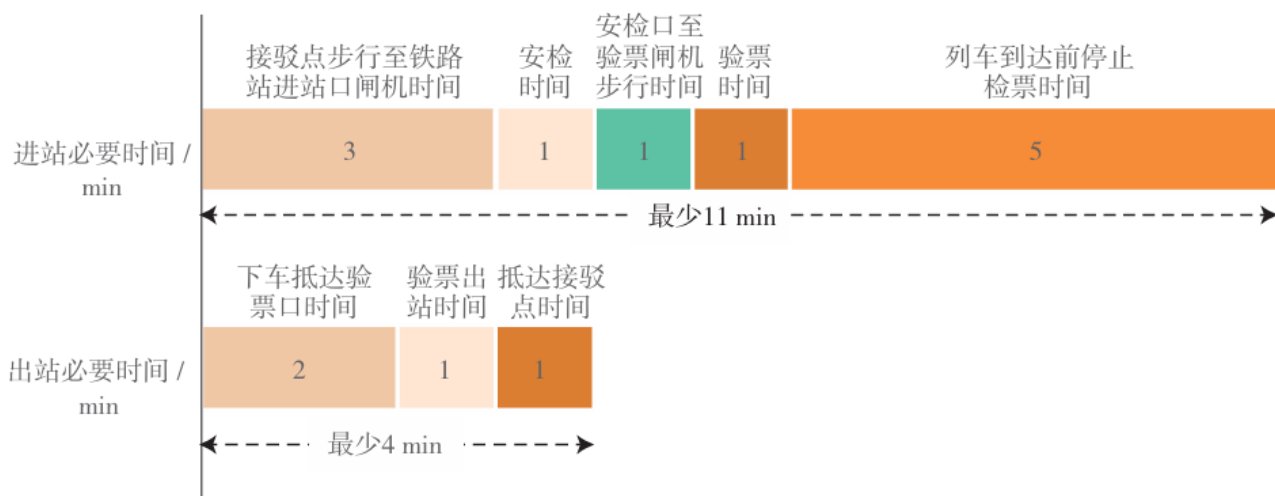


Figura 8. Descomposición del tiempo necesario para entrar y salir de la estación Chongzhou

3.3.4 Ausencia de autobuses ordinarios por la noche

Actualmente, 34 líneas de autobús sirven la estación, pero su último servicio termina antes de las 18:30. Los viajeros de trenes posteriores carecen, por tanto, de conexión. Los datos de billetes registran 917 viajeros con origen o destino en la estación después de las 18:30, de los que 297 salen y 620 llegan. Aplicando la cuota actual del autobús, un 16 %, la demanda nocturna se estima en unos 150 viajes (tabla 5), lo que justifica añadir servicios.

Tabla 5. Demanda nocturna de conexión mediante autobús ordinario en la estación Chongzhou

Sentido	Tren	Hora de salida o llegada a Chongzhou	Viajeros de salida / llegada	Demanda de conexión en autobús
Chongzhou hacia el centro	C3418	19:00	96	15
Chongzhou hacia el centro	C3422	19:54	69	11
Chongzhou hacia el centro	C6686	20:22	81	13
Chongzhou hacia el centro	C3426	21:32	51	8
Centro hacia Chongzhou	D6195	19:22	321	51
Centro hacia Chongzhou	C3372	20:39	127	20
Centro hacia Chongzhou	C6643	21:38	72	12
Centro hacia Chongzhou	C3462	21:49	55	9
Centro hacia Chongzhou	C3376	22:29	45	7
Total	—	—	917	147

4 Estrategia de ajuste preciso para la explotación de tipo transporte público de la línea Chengdu–Pujiang

Ante el número limitado de servicios, la uniformidad de las composiciones, la complejidad de los controles y la mala coordinación de las conexiones, la mejora debe seguir el principio de ajuste preciso entre oferta y demanda para responder a las necesidades del círculo y reforzar el papel del ferrocarril en la región metropolitana sobre raíles. Desde una perspectiva de cadena completa, las medidas se organizan en dos niveles: «optimizar los trenes» y «optimizar las estaciones». El primero comprende el ajuste de horarios y capacidad mediante paradas y composiciones (figura 9); el segundo, la mejora del funcionamiento de la estación y de las conexiones nocturnas (figura 10).

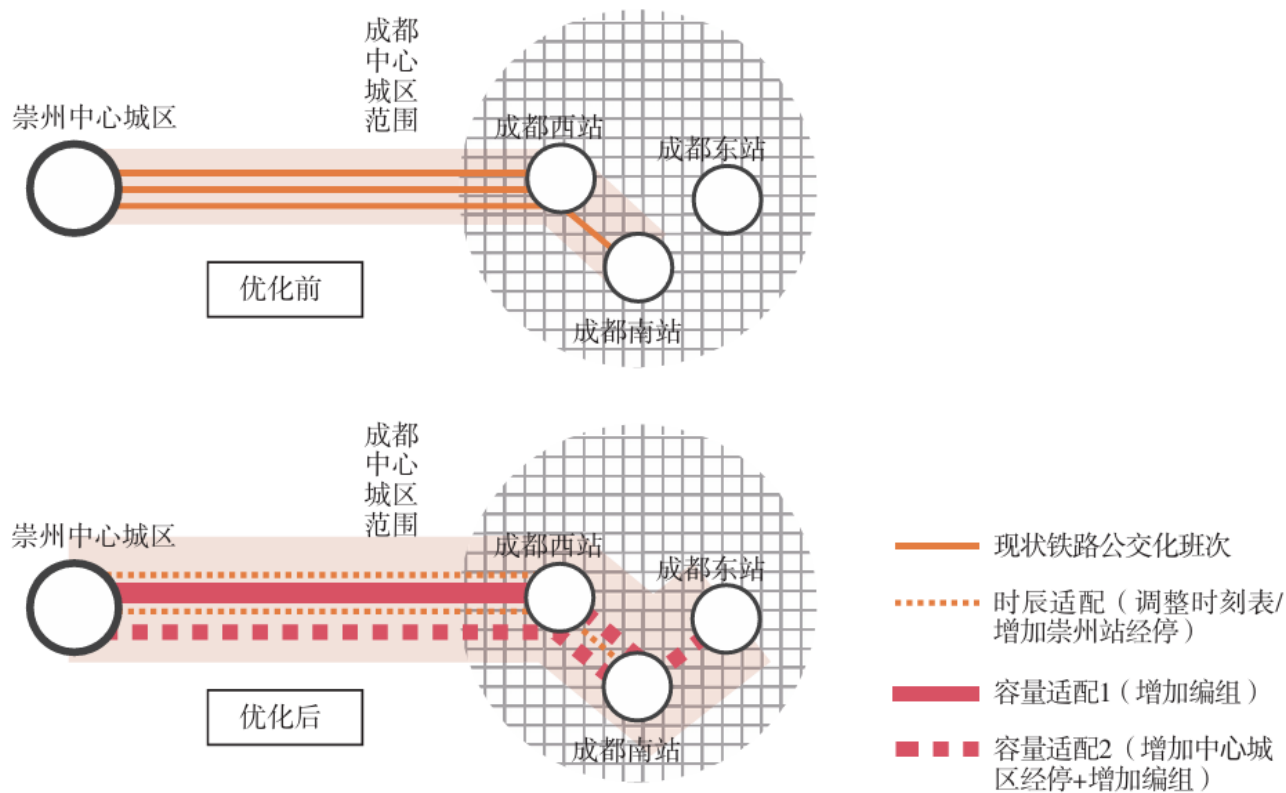


Figura 9. Estrategias de mejora de la explotación en el nivel de horarios y servicios

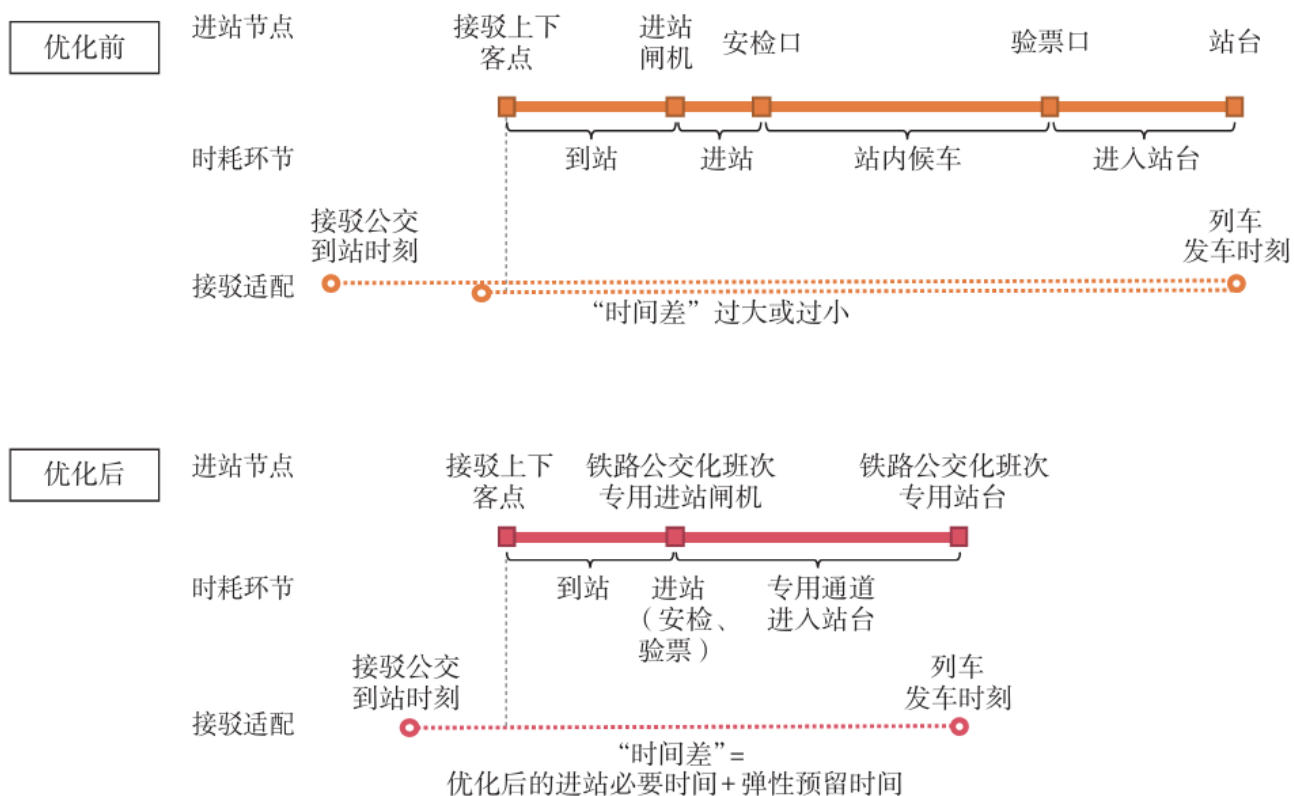


Figura 10. Estrategias de mejora en el nivel de la estación

4.1 Añadir servicios en hora punta y reforzar el ajuste horario

Los horarios existentes deben optimizarse bajo la restricción de las horas de entrada y salida del trabajo, con el fin de aumentar el número de trenes adecuados en las puntas. Se propone adelantar la salida del C3384 (Ya'an–Chengdu South) en Chongzhou de las 8:39 a las 8:10, y su llegada a Chengdu South de las 9:03 a las 8:34. La salida del C6606 (Qionglai–Chengdu West) en Chongzhou debería adelantarse de las 9:43 a una hora entre las 7:00 y las 8:00.

Para los trenes que atraviesan Chongzhou sin parada pero presentan un horario adecuado, se recomienda añadir una parada, especialmente en los servicios C3380 (7:27 Qionglai–8:00 Chengdu South), C3382 (7:03 Ya'an–8:20 Chengdu South) y C6639 (18:30 Chengdu West–18:48 Ya'an).

4.2 Optimizar las paradas y las composiciones para mejorar el ajuste de capacidad

Algunos trenes presentan horarios compatibles y ya paran, o podrían parar, en Chongzhou. Se recomienda aumentar su densidad de parada en las tres estaciones centrales de Chengdu y adaptar las composiciones a los flujos. El C3380 debería parar en Chongzhou, prolongarse hasta Chengdu East y pasar de cuatro a ocho coches. El C3382 debería prolongarse igualmente desde Chengdu South hasta Chengdu East y pasar de cuatro a ocho coches. Estas medidas corregirían la actual ausencia de un servicio ferroviario pendular hacia Chengdu East.

4.3 Optimizar la espera en la estación y mejorar el ajuste del funcionamiento

En el modelo actual —espera en el vestíbulo y cierre de la validación cinco minutos antes de la salida—, los viajeros que llegan poco antes del tren corren un alto riesgo de perderlo. Se propone asignar un andén exclusivo a los trenes pendulares de integración en el círculo. Los viajeros podrían esperar allí con antelación, sin estar vinculados a un tren concreto, y embarcar en el primero disponible. El control de seguridad y la validación deberían integrarse para reducir las interrupciones del recorrido.

Estas medidas permitirían reducir el tiempo necesario para entrar de unos once a seis minutos, mejorar notablemente la eficiencia y aumentar la sensación de seguridad del viaje ferroviario. Los espacios de billetes y espera deberían además integrarse para crear usos diversificados y ofrecer servicios personalizados a quienes disponen de tiempo.

4.4 Coordinar las conexiones con las llegadas y salidas ferroviarias

Después de las 18:30, la demanda de conexión es reducida y dispersa. Se recomienda crear líneas nocturnas de autobús estrechamente coordinadas con los trenes y controlar con precisión la diferencia horaria. Según el principio «tiempo necesario para entrar o salir + margen de tres minutos», los autobuses para los viajeros que salen de Chongzhou deberían llegar unos nueve minutos antes del tren; los destinados a quienes regresan deberían partir unos siete minutos después de su llegada.

A partir de la distribución de hogares y empleos, las líneas pueden diferenciarse según la distancia: los viajeros lejanos utilizarían servicios exprés que conecten rápidamente las principales paradas, mientras que los cercanos serían atendidos por itinerarios breves y encadenados, próximos a un servicio puerta a puerta.

5 Conclusión

La explotación ferroviaria de tipo transporte público constituye un modo eficiente, económico y cómodo, especialmente relevante en el contexto chino de desarrollo de nuevas ciudades periféricas y círculos de desplazamientos cotidianos. El estudio evalúa los efectos de la línea Chengdu–Pujiang y construye, desde la

perspectiva de la integración en el círculo, un marco de análisis basado en el ajuste preciso entre oferta y demanda. De este modo propone un nuevo método para la investigación y la práctica.

La viabilidad de este modelo depende de su capacidad para atraer a un grupo pendular relativamente estable. Entre Chongzhou y el centro de Chengdu, la cuota del tren sigue siendo baja frente al automóvil, lo que indica un potencial importante. Sin embargo, la capacidad ferroviaria ya se encuentra saturada en algunas puntas, lo que limita la calidad del servicio. La condición decisiva es, por tanto, la precisión del ajuste. Además de una eficiencia comparable a la del automóvil, es necesario responder a las expectativas diferenciadas de calidad y coste mediante productos diversos.

La explotación ferroviaria de tipo transporte público es un instrumento importante para integrar redes y reforzar los vínculos entre las nuevas ciudades y el centro urbano. Se recomiendan cuatro orientaciones.

(1) Centrar la actuación en la demanda. Los círculos de desplazamientos y las funciones de las nuevas ciudades varían entre metrópolis, al igual que sus etapas de desarrollo y la distribución espacio-temporal de los viajeros. Las prioridades deben adaptarse a cada ciudad: una nueva ciudad residencial debe atender principalmente a las puntas pendulares de los días laborables, mientras que una ciudad con fuerte concentración educativa debe analizar los desplazamientos escolares del fin de semana entre los centros educativos y la ciudad central.

(2) Mejorar la eficiencia de toda la cadena. El viaje ferroviario incluye múltiples etapas. Además del tiempo dentro del tren y la estación, la primera y la última milla son determinantes. Bajo una restricción de duración aceptable, mejorar la accesibilidad de las conexiones y cubrir más lugares de empleo y residencia [26] amplía el círculo potencial y aumenta los flujos ferroviarios.

(3) Garantizar una adaptación dinámica. La mejora de la oferta atraerá a más viajeros hacia el tren y generará alrededor de las estaciones una dinámica de desarrollo próxima al TOD urbano. La distribución espacio-temporal de hogares y empleos seguirá cambiando; por ello es necesario analizar periódicamente la evolución de la demanda y ajustar dinámicamente las medidas.

(4) Innovar para mejorar la calidad. La experiencia internacional reconoce progresivamente la «utilidad positiva del desplazamiento cotidiano» [27], entendido como tiempo personal de descanso y transición útil [28]. Las innovaciones que combinen calidad y coste —por ejemplo, asiento garantizado con un ligero recargo— pueden priorizar el confort y consolidar el atractivo del tren.

Los autores agradecen al comité municipal del Partido, al gobierno de Chongzhou y a los servicios ferroviarios locales los datos proporcionados. Agradecen asimismo a Zhang Hanshuang, Li Jia, Wang Yujia, Wang Geyang, Li Li, Jia Yunxiang, Feng Shiyang, Jin Yang y Cao Juanjuan su contribución a la encuesta y al análisis.

Notas

① Definición de región metropolitana moderna contenida en las Orientaciones de la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma para la formación y el desarrollo de regiones metropolitanas modernas (Fagai Guihua [2019] n.º 328).

② En 2021, Shanghái publicó las Opiniones de implementación para acelerar la planificación y construcción de nuevas ciudades durante el XIV Plan Quinquenal; Pekín, el Plan de implementación para promover el desarrollo de alta calidad de las nuevas ciudades de la llanura y reforzar su capacidad de acogida; y Chengdu publicó en 2022 las Opiniones de implementación para mejorar y fortalecer el centro urbano, los nuevos distritos y las nuevas ciudades periféricas y perfeccionar las funciones urbanas.

- ③ Véase The Paper: «Shanghai Jinshan Railway, primera explotación ferroviaria de tipo transporte público: 85 millones de viajeros en diez años», 28 de septiembre de 2022, https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_20092699.
- ④ La delimitación parte de la isócrona ferroviaria de una hora y se ajusta según los límites administrativos y los desplazamientos reales. Los principales parámetros son: velocidad ferroviaria de 110 km/h, calculada a partir de las distancias entre estaciones y los horarios; conexión en autobús en Chongzhou a 15 km/h; y conexión en metro en el centro de Chengdu a 35 km/h.
- ⑤ Para un tren CRH6A de uso habitual, cada coche dispone de 62 asientos y una capacidad nominal de 172 viajeros; la capacidad correspondiente al nivel de servicio aceptable se fija en 120. La tasa de ocupación de asientos alcanza el 100 % con 62 viajeros y la tasa de carga el 100 % con 120, límite de congestión aceptable. Entre 120 y 172 viajeros, la tasa de carga supera el 100 % y corresponde a un estado de fuerte sobresaturación.

Referencias

- [1] GAO Guoli, QIU Aijun, PAN Zhaoyu, et al. Comprender objetivamente las características del círculo de desplazamientos de una hora para apoyar el desarrollo estable de las regiones metropolitanas modernas en China [J]. *Macroeconomic Management*, 2023(1): 26-32.
- [2] WANG Guangtao, LI Fen, LIU Xiang, et al. Nueva configuración de la urbanización en la nueva etapa de desarrollo: concepto y criterios de identificación de las regiones metropolitanas modernas [J]. *Urban Planning Forum*, 2021(2): 15-24.
- [3] CHAI Yanwei, ZHANG Xue, SUN Daosheng. Planificación de círculos de vida urbanos basada en comportamientos espacio-temporales: el caso de Pekín [J]. *Urban Planning Forum*, 2015(3): 61-69.
- [4] GUO Liang, ZHENG Chaoyang, HUANG Jianzhong, et al. Optimización de la estructura espacial de las grandes ciudades mediante la identificación del círculo de desplazamientos: el caso del centro de Wuhan [J]. *City Planning Review*, 2019, 43(10): 43-54.
- [5] WU Yimin, LI Wei, DU Liqun, et al. Identificación, características y modelos de desplazamiento transfronterizo del círculo de Pekín [J]. *Planners*, 2023, 39(6): 56-62.
- [6] PAN Zhaoyu. Cuestiones clave de la planificación y construcción del transporte ferroviario en las regiones metropolitanas [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2020, 33(6): 7-14.
- [7] ZHANG Yan, GU Zhihui, ZHOU Wei. Correspondencia entre empleo y vivienda en las grandes ciudades y coordinación con el transporte ferroviario: el caso de Shenzhen [J]. *Urban Planning Forum*, 2018(1): 99-106.
- [8] CHEN Tao, PAN Haixiao. Acoplamiento entre la red ferroviaria urbana de Shanghai y la distribución de la población y el empleo [J]. *Urban Planning Forum*, 2020(5): 32-38.
- [9] WANG Chen, CAI Runlin, GENG Jian, et al. Modelo TOD del transporte ferroviario orientado a la integración de redes: contenido, prioridades y sistema, el caso de Suzhou [J]. *Urban Planning Forum*, 2022(S2): 135-141.
- [10] WANG Deli. Construcción del ferrocarril suburbano y reestructuración espacial del círculo de desplazamientos de una hora de las megaciudades: análisis empírico del entorno de Pekín [J]. *Urban Problems*, 2023(12): 70-77.

- [11] JU Xiaoting, DU Fengjiao, XIONG Jian, et al. Las cinco nuevas ciudades de Shanghai: optimización del sistema funcional desde la perspectiva de la región urbana global [J]. Urban Planning Forum, 2022(3): 72-79.
- [12] ZHANG Hongwei, LI Wenju, REN Chong. Modelo de organización del transporte de pasajeros en la línea Chengdu–Pujiang [J]. High-Speed Railway Technology, 2011, 2(2): 42-46.
- [13] WANG Jing, LAI Yihuan, LIU Jianfeng. Método de previsión de flujos del ferrocarril regional y suburbano basado en perfiles de pasajeros [J]. Urban Transport of China, 2023, 21(2): 102-108.
- [14] ZHANG Kuo, HUANG Xin, QU Xinmiao, et al. Medidas de explotación de tipo transporte público del ferrocarril interurbano basadas en el análisis de la demanda: el caso Pekín–Tianjin [J]. Modern Urban Research, 2017(10): 81-88.
- [15] ZOU Minghui. Modelos de explotación de tipo transporte público de los ferrocarriles interurbanos en la Gran Bahía Guangdong–Hong Kong–Macao [J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(4): 91-95.
- [16] LI Jie, YANG Liuwen, LI Ouyang. Estrategias innovadoras para la explotación de tipo transporte público del interurbano Changsha–Zhuzhou–Xiangtan [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 1-5.
- [17] SUN Rong, TIAN Wo, JIANG Zhiwei. Sistema tarifario para la explotación de tipo transporte público del ferrocarril interurbano Shenzhen–Huizhou [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(3): 17-21.
- [18] HU Xiaodan, SONG Yuansheng, CAO Linwei. Modelo de gestión para la explotación de trenes de tipo transporte público en líneas existentes [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 104-108.
- [19] GOSTENINA V, MELNIKOV S, SYCHEVA E, et al. Development of an optimization model for commuter train traffic (case study of the Bryansk region, Russia) [J]. Transportation Research Procedia, 2022, 63: 1034-1041.
- [20] RAHMAN M, AKTHER S. Intercity commuting in metropolitan regions: a mode choice analysis of commuters traveling to Dhaka from nearby cities [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2022, 148(1): 05021060.
- [21] SHANTZ A, CASELLO J, WOULD SMA C, et al. Understanding factors associated with commuter rail ridership: a demand elasticity study of the GO Transit rail network [J]. Transportation Research Record, 2022, 2676(8): 131-143.
- [22] SHI J, YANG J, YANG L, et al. Safety-oriented train timetabling and stop planning with time-varying and elastic demand on overcrowded commuter metro lines [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 175: 103136.
- [23] ZUO T, WEI H, CHEN N. Promote transit via hardening first-and-last-mile accessibility: learned from modeling commuters' transit use [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 86: 102446.
- [24] KUMAGAI J, WAKAMATSU M, MANAGI S. Do commuters adapt to in-vehicle crowding on trains? [J]. Transportation, 2021, 48: 2357-2399.
- [25] VARGHESE V, CHIKARAISHI M, KATO H. Analysis of travel-time use in crowded trains using discrete-continuous choices of commuters in Tokyo, Japan [J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(10): 189-198.
- [26] TILAHUN N, THAKURIAH P V, LI M, et al. Transit use and the work commute: analyzing the role of last mile issues [J]. Journal of Transport Geography, 2016, 54: 359-368.
- [27] OKUBO T, KITANO N, MORIMOTO A. A transportation choice model on the commuter railroads using inverse reinforcement learning [J]. Asian Transport Studies, 2022, 8: 100072.

[28] REDMOND L S, MOKHTARIAN P L. The positive utility of the commute: modeling ideal commute time and relative desired commute amount [J]. Transportation, 2001, 28: 179-205.

Versión revisada: agosto de 2024

Traducción asistida por IA