



CÂN BẰNG PHÁT THẢI ĐÔ THỊ VÀ TRỮ LƯỢNG CÁC-BON TRONG HỆ THỐNG ĐÔ THỊ MIỀN NÚI - PHÂN TÍCH TÍCH HỢP VIỄN THÁM VÀ ĐỊNH HƯỚNG HẠ TẦNG PHÁT THẢI THẤP TẠI TỈNH CAO BẰNG

Balancing Urban Emissions and Carbon Storage in a Mountainous Urban System: An Integrated Remote Sensing Approach for Low-carbon Infrastructure Planning in Cao Bang Province

TS. Võ Thanh Huy¹

Tóm tắt: Nghiên cứu xây dựng khung phân tích không gian nhằm đánh giá cân bằng giữa phát thải đô thị và tiềm năng lưu trữ các-bon tự nhiên trong hệ đô thị miền núi tỉnh Cao Bằng. Dữ liệu viễn thám và cơ sở dữ liệu công trình được tích hợp trên nền tảng Google Earth Engine để lượng hóa tổng diện tích sàn xây dựng, nhiệt độ bề mặt mùa hè, tỷ lệ diện tích quá nhiệt (>35°C), độ dốc địa hình và tiềm năng hấp thụ sinh thái theo 56 xã/phường. Từ đó, nghiên cứu đề xuất mô hình lõi phát thải – lõi lưu trữ các-bon và khung phân vùng ba lớp nhằm định hướng hạ tầng phát thải thấp và quy hoạch dựa trên sức chịu tải sinh thái cho đô thị miền núi.

Từ khóa: Đô thị miền núi, phát thải các-bon, nhiệt độ bề mặt, tỷ lệ quá nhiệt, các-bon sinh thái, Google Earth Engine, Cao Bằng.

Abstract: This study develops a spatial framework to assess the balance between urban emissions and natural carbon storage in the mountainous urban system of Cao Bang Province, Vietnam. Multi-source geospatial datasets were integrated on Google Earth Engine

to derive indicators of building floor area, summer land surface temperature, overheat areas (>35°C), average slope, and ecological carbon sink potential at the commune/ward level (56 units). The study proposes an emission–carbon sink core model and a three-tier spatial zoning framework to support low-carbon infrastructure planning and ecological carrying-capacity-based urban development in mountainous cities.

Keywords: Mountainous urban system, carbon emissions, land surface temperature, overheat ratio, ecological carbon sink, Google Earth Engine, Cao Bang.

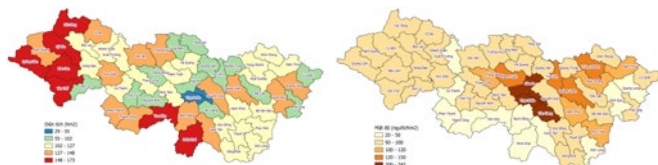
Nhận bài ngày 27/01/2026, chỉnh sửa ngày 16/02/2026, chấp nhận đăng ngày 29/3/2026.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Năng nóng cục đoạn và tích tụ nhiệt đô thị đang tăng nhanh dưới tác động biến đổi khí hậu, nhưng phần lớn bằng chứng và công cụ đánh giá vẫn thiên về đô thị đồng bằng. Ở đô thị miền núi,

¹ Nhóm nghiên cứu Đổi mới Công nghệ và Dữ liệu phục vụ phát triển bền vững (iTechdata_SDGs), Trường Đại học Xây dựng miền Trung (Bộ Xây dựng)
Email: vothanhhuy@muce.edu.vn

rủi ro nhiệt và phát thải không chỉ phản ánh cường độ xây dựng, mà còn bị *định hình* bởi địa hình dốc, quỹ đất bằng hạn chế khiến đô thị hóa dồn nén theo thung lũng, và hệ sinh thái rừng đóng vai trò bể các-bon kiềm cơ chế điều hòa vi khí hậu [1][3]. Khi mở rộng xây dựng gia tăng bề mặt không thấm và xâm lấn không gian sinh thái, hệ thống có thể đồng thời mất *khả năng hấp thụ* và *tăng nguồn phát thải-nhiệt*, làm khuếch đại rủi ro khí hậu tại những nơi vốn nhạy cảm với lũ quét, ngập cục bộ và sạt lở [4][11]. Cao Bằng là một trường hợp điển hình của cấu trúc này, nơi phát triển tập trung ở thung lũng trung tâm trong khi phần lớn diện tích còn lại là rừng và sườn dốc có giá trị sinh thái cao.



Hình 1. Sơ đồ phân bố không gian và mật độ dân cư tỉnh Cao Bằng (2 cấp)

Tuy vậy, còn thiếu một khung phân tích thống nhất ở cấp xã/phường có thể lượng hóa đồng thời quy mô xây dựng, điều kiện địa hình-sinh thái và trường nhiệt mùa hè để hỗ trợ trực tiếp quy hoạch địa phương. Bài viết này tiếp cận để đánh giá việc cách tích hợp dữ liệu viễn thám và cơ sở dữ liệu công trình trên Google Earth Engine để lượng hóa tổng diện tích sàn, nhiệt độ bề mặt mùa hè, tỷ lệ quá nhiệt ($>35^{\circ}\text{C}$), độ dốc và lớp phủ rừng ở 56 xã/phường [12]–[15]. Từ đó, nghiên cứu nhận diện cấu trúc lõi phát thải-lõi lưu trữ các-bon và đề xuất phân vùng không gian dựa trên sức chịu tải sinh thái nhằm định hướng hạ tầng phát thải thấp và thích ứng khí hậu cho đô thị miền núi.

II. VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Khung tiếp cận nghiên cứu

Nghiên cứu tiếp cận đô thị miền núi như một hệ thống tương tác giữa không gian xây dựng (đại diện cho áp lực phát thải khí nhà kính và phát thải nhiệt) và hệ sinh thái tự nhiên (đóng vai trò bể hấp thụ, lưu trữ các-bon thông qua thảm thực vật, lớp phủ rừng và nền địa hình dốc). Theo đó, thay vì kiểm kê phát thải theo hướng năng lượng truyền thống, nghiên cứu xây dựng khung đánh giá không gian tích hợp dựa trên các chỉ số gián tiếp khai thác từ dữ liệu viễn thám và cơ sở dữ liệu công trình.

Phương pháp tích hợp bốn nhóm dữ liệu: (i) Lớp phủ và thảm thực vật, (ii) Địa hình, (iii) Công trình và dân số, và (iv) Nhiệt độ bề mặt mùa hè. Quy trình thu thập, tiền xử lý, tính toán raster và chuẩn hóa chỉ số được thực hiện trên Google Earth Engine (GEE)[13], sau đó xuất dữ liệu và tổng hợp thống kê theo đơn vị hành chính xã/phường trong QGIS để phục vụ phân tích không gian và định lượng.

Khung phương pháp luận gồm ba nhóm chỉ số: Cường độ xây dựng và chỉ số phát thải gián tiếp, nhiệt độ bề mặt mùa hè và tỷ lệ diện tích quá nhiệt ($>35^{\circ}\text{C}$), và tiềm năng hấp thụ các-bon tự nhiên. Việc tích hợp ba nhóm chỉ số cho phép đánh giá cân bằng không gian giữa phát thải và lưu trữ các-bon trong bối cảnh đô thị miền núi.

2.2. Dữ liệu nghiên cứu

Phạm vi và ranh giới hành chính: Nghiên cứu thực hiện trên toàn tỉnh Cao Bằng. Ranh giới hành chính được lấy từ bộ dữ liệu hành chính toàn cầu, chuẩn hóa WGS84 và cắt theo ranh giới tỉnh trước khi tổng hợp theo xã/phường (sau sáp nhập 01/7/2025) nhằm tăng khả năng ứng dụng cho quản lý và quy hoạch địa phương.

Lớp phủ/sử dụng đất: Lớp phủ mặt đất sử dụng ESA WorldCover độ phân giải 10m[14], gồm các lớp chính (rừng, cây bụi, đất trống trọt, đất xây dựng, mặt nước, đất trống). Trên GEE, dữ liệu được cắt theo tỉnh và tái phân loại thành hai nhóm trọng tâm: Không gian xây dựng và không gian có thảm thực vật để phục vụ phân tích nền sinh thái và chống lớp.

Thảm thực vật (NDVI): NDVI được tính từ Sentinel-2 (surface reflectance), lọc theo thời gian nghiên cứu và loại mây bằng lớp chất lượng; ảnh tổ hợp trung vị dùng để giảm nhiễu. $\text{NDVI} > 0.5$ được xem là thảm thực vật phát triển tốt, đại diện tiềm năng hấp thụ/lưu trữ các-bon cao[15].

Địa hình và độ dốc: DEM từ SRTM/FABDEM (30m) được dùng để tính độ dốc trên GEE. Các khu vực dốc $> 25^{\circ}$ được xem là không gian có vai trò sinh thái/bảo vệ sườn dốc quan trọng và hạn chế phát triển xây dựng; lớp này dùng trong phân tích tiềm năng lưu trữ và tương quan với nhiệt bề mặt[16].

Công trình và quy mô xây dựng: Dữ liệu đa giác công trình từ Open Buildings được lọc theo phạm vi tỉnh. Tổng diện tích sàn được ước tính từ diện tích mặt bằng nhân hệ số số tầng (suy từ chiều cao trung bình/hệ số quy đổi), sau đó tổng hợp theo xã/phường; chỉ tiêu này phản ánh cường độ không gian xây dựng và phát thải tiềm năng[17].

Dân số: Mật độ dân số lấy từ cơ sở dữ liệu dân số dạng lưới và tổng hợp theo đơn vị hành chính; biến này được dùng làm yếu tố bổ trợ trong chỉ số phát thải gián tiếp, phản ánh cường độ cư trú/tiêu thụ tương đối[6][18].

Nhiệt độ bề mặt và quá nhiệt: Nhiệt độ bề mặt (LST) khai thác từ dữ liệu hồng ngoại nhiệt trên GEE, lọc mùa hè và loại mây. LST mùa hè trung bình tính theo tổ hợp trung vị/trung bình theo pixel [12], [15], [19]. Tỷ lệ quá nhiệt xác định bằng phần trăm diện tích pixel có $\text{LST} > 35^{\circ}\text{C}$ trong mỗi xã/phường, nhằm đánh giá đồng thời nền nhiệt và mức cực đoan nhiệt.

2.3. Xây dựng các chỉ số phân tích

Từ các lớp đầu vào, nghiên cứu xây dựng ba nhóm chỉ số: Mật độ xây dựng = tổng diện tích sàn/ diện tích đơn vị hành chính; Chỉ số phát thải gián tiếp = hàm trọng số của mật độ xây dựng và mật độ dân số (các biến chuẩn hóa tuyến tính). Chỉ số này không thay thế kiểm kê phát thải, nhưng hỗ trợ nhận diện sớm khu vực rủi ro cao khi thiếu dữ liệu năng lượng; Tiềm năng hấp thụ các-bon tự nhiên xác định bằng chồng lớp ba điều kiện: $\text{NDVI} > 0.5$, lớp phủ cây (WorldCover), và độ dốc $> 25^{\circ}$. Nhóm chỉ số nhiệt (LST trung bình và tỷ lệ quá nhiệt) được dùng để phân tích mối liên hệ giữa phát triển xây dựng, địa hình và rủi ro nhiệt [20], [21].

2.4. Phân tích không gian và đánh giá cân bằng phát thải – lưu trữ

Sau khi chuẩn hóa, các chỉ số được chồng lớp để xác định: Vùng cường độ phát thải cao, vùng tiềm năng hấp thụ cao và vùng

chuyển tiếp. Các xã/phường được phân loại thành ba nhóm: Lõi phát thải – trung gian – lõi lưu trữ các-bon. Phân tích tương quan ở cấp xã/phường được thực hiện giữa diện tích sàn, LST trung bình, tỷ lệ quá nhiệt và độ dốc trung bình nhằm làm rõ quan hệ định lượng giữa phát triển xây dựng, địa hình và cấu trúc nhiệt.

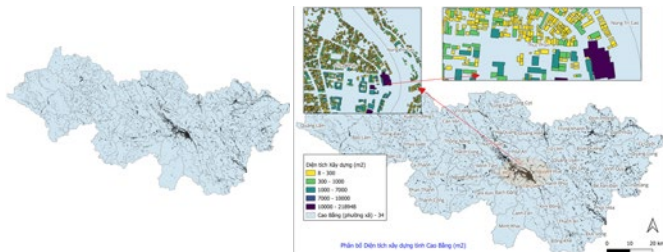
2.5. Ý nghĩa phương pháp luận

Cách tiếp cận tích hợp viễn thám đa nguồn và dữ liệu công trình cho phép lập bản đồ cân bằng phát thải – lưu trữ ở quy mô toàn tỉnh mà không phụ thuộc hoàn toàn vào thống kê năng lượng. Việc kết hợp phát thải gián tiếp, nhiệt bề mặt và tiềm năng sinh thái phù hợp với đặc thù đô thị miền núi; phân tích theo xã/phường giúp tăng khả năng ứng dụng chính sách. Nền tảng GEE hỗ trợ tái lập quy trình, mở rộng cho tỉnh khác và cập nhật định kỳ theo biến động đô thị và suy giảm sinh thái.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân bố không gian diện tích xây dựng và hình thái tập trung theo trục đô thị trung tâm

Bản đồ diện tích xây dựng cho thấy cấu trúc phát triển của Cao Bằng phân hóa rõ theo không gian: Mật độ công trình tập trung mạnh ở đô thị trung tâm và hình thành hành lang xây dựng liên tục dọc các thung lũng, trong khi đa số xã/phường ngoại vi có phân bố thưa, phân tán và đứt đoạn. Mô hình này phản ánh đặc trưng đô thị miền núi, nơi quỹ đất bằng hạn chế dẫn tới phát triển dồn nén theo trục thung lũng, đồng thời làm tăng áp lực hạ tầng và mở rộng bề mặt không thấm tại các khu vực nhạy cảm với ngập cục bộ và lũ quét.



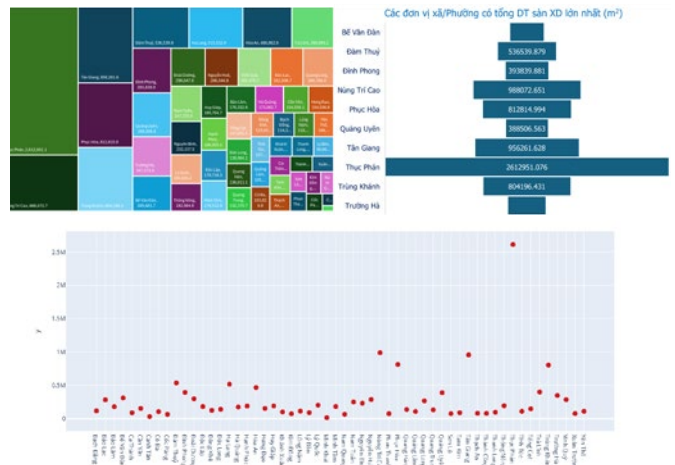
Hình 2. Phân bố tổng diện tích sàn xây dựng theo xã/phường tại tỉnh Cao Bằng (m²)

Ở vùng có cường độ xây dựng cao, ảnh phóng đại cho thấy lõm thừa dày, kích thước công trình đa dạng và xuất hiện một số cụm công trình quy mô lớn nổi bật so với nền xung quanh. Các cụm này hàm ý điểm nóng phát thải theo điểm do thường gắn với chức năng dịch vụ–thương mại/công cộng có cường độ sử dụng năng lượng cao. Do đó, kết quả không gian là cơ sở để khoanh vùng ưu tiên cho kiểm kê phát thải, kiểm soát phát triển theo sức chịu tải hạ tầng và lựa chọn giải pháp giảm phát thải theo khu vực (Hình 2).

3.2. Chênh lệch tổng diện tích sàn xây dựng theo xã/phường và nhận diện nhóm điểm nóng phát triển xây dựng theo các yếu tố nhiệt độ nền, tỷ lệ % vùng quá nhiệt và độ dốc trung bình

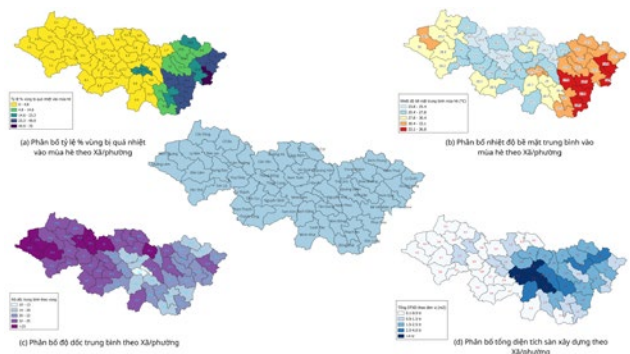
Tổng hợp theo 56 đơn vị hành chính cho thấy tổng diện tích sàn xây dựng phân tầng rõ rệt: Một nhóm nhỏ xã/phường tạo thành các cực tập trung vượt trội, chủ yếu nằm ở vùng lõi đô thị và hành lang thung lũng, trong khi phần lớn còn lại thuộc mức thấp – trung bình. Cấu trúc này cho thấy đô thị hóa tại Cao Bằng mang

tính tập trung hóa, kéo theo rủi ro phát thải và áp lực hạ tầng cũng tập trung theo không gian tương ứng.



Hình 3. Thống kê và xếp hạng các xã/phường có tổng diện tích sàn xây dựng lớn nhất (m²)

Biểu đồ xếp hạng (Hình 3) củng cố nhận định về mức độ tập trung: Nhóm đứng đầu có khoảng cách đáng kể so với nhóm trung bình, cho thấy chỉ một số ít đơn vị đóng góp phần lớn quy mô sàn toàn tỉnh. Về quản lý đô thị phát thải thấp, kết quả này giúp cho phân bổ ưu tiên, tập trung can thiệp vào các đơn vị xã/phường đứng đầu có thể tạo hiệu quả lớn trong kiểm soát gia tăng diện tích sàn, tiêu chuẩn công trình và giảm phát thải vận hành/vật liệu.



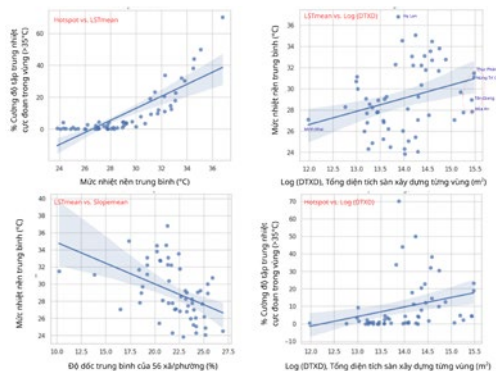
Hình 4. Phân bố tỷ lệ vùng quá nhiệt vào mùa hè, nhiệt độ nền trung bình, độ dốc trung bình và tổng diện tích sàn xây dựng theo bản đồ 56 xã/phường tỉnh Cao Bằng

Khi xem xét đồng thời nhiệt độ nền mùa hè, tỷ lệ quá nhiệt (>35°C), độ dốc trung bình và tổng diện tích sàn (Hình 4), một cấu trúc không gian nhất quán được nhận diện. Nhiệt độ nền thấp tập trung ở các xã miền núi có địa hình cao và che phủ sinh thái tốt; ngược lại, dải trung tâm – đồng nam dọc thung lũng ghi nhận nhiệt độ nền cao hơn và tỷ lệ quá nhiệt lớn, nhiều nơi vượt ngưỡng đáng kể. Hai chỉ tiêu nhiệt đồng biến theo không gian, cho thấy không chỉ nền nhiệt tăng mà mức cực đoan nhiệt cũng gia tăng tại cùng các khu vực. Trái lại, độ dốc trung bình thể hiện xu thế nghịch biến với nhiệt: Các xã miền núi phía tây/tây bắc có độ dốc cao, trong khi vùng thung lũng có độ dốc thấp hơn. Đáng chú ý, các xã/phường có tổng diện tích sàn lớn cũng là nơi có nhiệt độ nền và tỷ lệ quá nhiệt cao, qua đó xác định các điểm nóng môi trường nhiệt cần ưu tiên trong quy hoạch và kiểm soát phát triển. Ngược lại, nhóm xã có độ dốc cao

và phát triển xây dựng thấp đóng vai trò vùng đệm sinh thái, góp phần duy trì cân bằng nhiệt toàn tỉnh. Các phát hiện này là cơ sở thực nghiệm để tiếp tục lượng hóa mối quan hệ giữa phát triển xây dựng, địa hình và trường nhiệt, phục vụ thảo luận định hướng hạ tầng phát thải thấp và thích ứng khí hậu.

3.3. Tương quan giữa các yếu tố tác động nhiệt độ nền bề mặt trung bình và tỷ lệ vùng khí hậu cực đoan

Hình 5 và Bảng 1 minh họa các mối quan hệ tương quan giữa nhiệt độ bề mặt trung bình mùa hè (LSTmean), tỷ lệ diện tích quá nhiệt (>35°C), tổng diện tích xây dựng (log-DTXD), và độ dốc trung bình theo đơn vị hành chính cấp xã tại tỉnh Cao Bằng. Kết quả cho thấy tỷ lệ diện tích quá nhiệt tăng mạnh theo nhiệt độ bề mặt trung bình, thể hiện mối tương quan dương rõ rệt và gần tuyến tính. Các xã có LSTmean trên 32°C thường ghi nhận tỷ lệ hotspot vượt 20%, trong khi các xã có LST dưới 27°C gần như không xuất hiện quá nhiệt đáng kể. Điều này cho thấy LSTmean có thể được xem là chỉ báo dự báo mạnh về cường độ quá nhiệt cực bộ. Diện tích xây dựng (log(DTXD)) có mối quan hệ dương với cả LSTmean và hotspot, tuy mức độ phân tán lớn hơn. Các xã có quy mô xây dựng cao thường tập trung ở vùng trung tâm và thung lũng, đồng thời ghi nhận mức nhiệt trung bình và tỷ lệ quá nhiệt cao hơn đáng kể so với các xã miền núi phía tây. Xu thế này phản ánh vai trò của bề mặt không thấm và mật độ xây dựng trong việc khuếch đại hiệu ứng đảo nhiệt bề mặt tại khu vực miền núi.



Hình 5. Mối quan hệ giữa nhiệt độ bề mặt mùa hè, tỷ lệ quá nhiệt, diện tích xây dựng và độ dốc địa hình tại 56 xã/phường tỉnh Cao Bằng

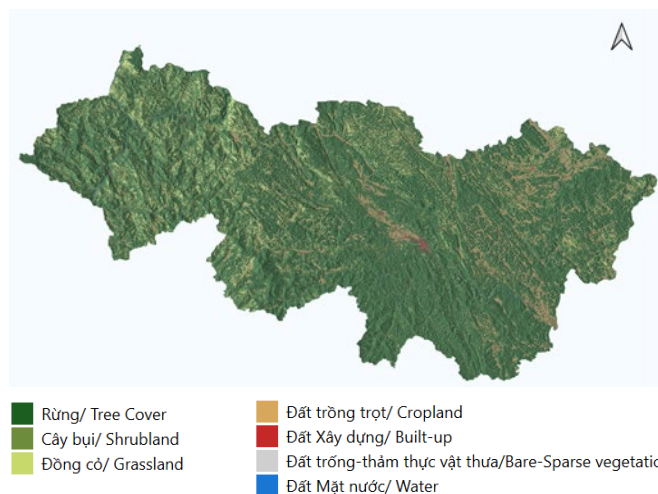
Ngược lại, độ dốc trung bình thể hiện mối quan hệ âm với nhiệt độ nền. Các xã có độ dốc lớn hơn 23–25° thường ghi nhận nhiệt độ bề mặt thấp hơn đáng kể, trong khi các khu vực có địa hình bằng phẳng hoặc thung lũng có xu hướng tích tụ nhiệt cao hơn. Kết quả này cho thấy yếu tố địa hình đóng vai trò điều hòa vi khí hậu thông qua thông gió tự nhiên và tỷ lệ che phủ sinh thái. Tổng hợp bốn mối quan hệ cho thấy cấu trúc không gian nhiệt tại Cao Bằng được chi phối đồng thời bởi hai nhóm yếu tố chính: Áp lực nhân sinh thông qua mở rộng xây dựng và gia tăng bề mặt không thấm, và điều kiện địa hình tự nhiên, đặc biệt là độ dốc và cấu trúc thung lũng. Đáng chú ý, mối liên hệ rất mạnh giữa LST và hotspot khẳng định rằng sự gia tăng nhiệt nền không chỉ làm tăng nhiệt độ trung bình mà còn làm gia tăng nhanh chóng diện tích chịu cực đoan nhiệt.

Phát hiện quan trọng nhất từ kết quả trên là sự kết hợp giữa địa hình thấp – mật độ xây dựng cao – và tích tụ nhiệt bề mặt tạo thành tam giác rủi ro nhiệt đô thị tại các phường/xã trung tâm. Điều này

hàm ý rằng trong bối cảnh biến đổi khí hậu, các chiến lược phát triển hạ tầng tại tỉnh Cao Bằng cần đặc biệt kiểm soát mở rộng xây dựng tại các vùng thung lũng bằng phẳng, đồng thời tăng cường giải pháp hạ tầng xanh và bề mặt thấm nước để giảm nguy cơ quá nhiệt cực bộ. Kết quả cung cấp bằng chứng định lượng rõ ràng cho việc tích hợp yếu tố địa hình và cấu trúc xây dựng vào quy hoạch phát triển đô thị phát thải thấp và thích ứng khí hậu tại các tỉnh miền núi.

3.4. Định hướng và giải pháp

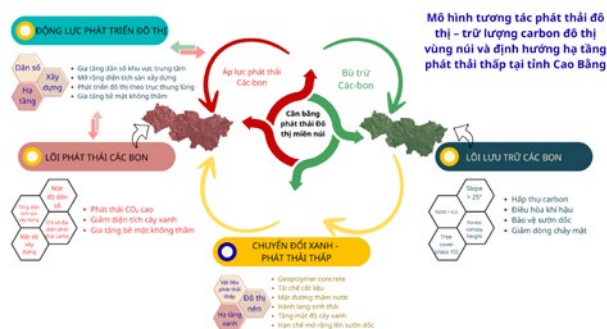
Phân tích chống lớp ở cấp xã/phường cho thấy trường nhiệt mùa hè của Cao Bằng không phân bố ngẫu nhiên mà được định hình bởi tương tác giữa mật độ xây dựng, địa hình và lớp phủ sinh thái, qua đó tạo ra một cấu trúc hai cực rõ rệt: Lõi phát thải tập trung trong các thung lũng đô thị hóa và lõi lưu trữ các-bon trải trên sườn dốc và không gian rừng bao quanh. Mối tương quan dương mạnh giữa nhiệt độ nền và tỷ lệ quá nhiệt (>35°C) cho thấy khi nền nhiệt tăng, cực đoan nhiệt tăng nhanh hơn theo hướng phi tuyến tiềm năng gây rủi ro sức khỏe và nhu cầu làm mát sẽ bị khuếch đại ngay cả khi biến đổi trung bình chỉ ở mức vừa phải. Đồng thời, tổng diện tích sàn đồng biến với cả nhiệt độ nền và quá nhiệt, củng cố vai trò của tích tụ xây dựng và bề mặt không thấm như một động lực chính của rủi ro nhiệt đô thị; ngược lại, độ dốc kết hợp che phủ sinh thái có tác dụng điều hòa, gợi ý rằng hạ tầng tự nhiên (Hình 6) không chỉ là bể các-bon mà còn là cơ chế giảm nhiệt mang tính hệ thống.



Hình 6. Hiện trạng lớp phủ sử dụng đất tỉnh Cao Bằng theo WorldCover và nền địa hình minh họa

Từ các bằng chứng này, mô hình quản trị theo không gian có thể được rút gọn thành ba lớp ưu tiên: (1) Lõi phát thải - nơi cần kiểm soát gia tăng diện tích sàn, nâng chuẩn công trình phát thải thấp và tối ưu hạ tầng kỹ thuật; (2) Vùng chuyển tiếp - nơi hiệu quả nhất để triển khai hạ tầng xanh - xanh lam (hành lang sinh thái, bề mặt thấm, hồ điều hòa, tầng che phủ cây xanh) nhằm cắt điểm nóng nhiệt; (3) Lõi lưu trữ - nơi cần bảo tồn rừng và hạn chế chuyển đổi đất, đặc biệt trên sườn dốc lớn, để duy trì sức chịu tải sinh thái và giảm rủi ro thiên tai (Hình 7). Cách tiếp cận này phù hợp với bối cảnh thiếu dữ liệu kiểm kê năng lượng chi tiết ở địa phương, nhưng cũng có giới hạn: Chỉ số phát thải hiện mang tính gián tiếp và trữ lượng các-bon mới dừng ở tiềm năng theo lớp phủ. Các nghiên cứu tiếp theo nên tích hợp dữ liệu tiêu thụ năng

lượng theo loại công trình và mô hình sinh khối/chu trình các-bon theo loại rừng để chuyển từ nhận diện điểm nóng sang định lượng phát thải - hấp thụ với độ tin cậy cao hơn. Dù vậy, kết quả hiện tại đã cung cấp một cơ sở định lượng đủ mạnh để lồng ghép đồng thời mục tiêu giảm phát thải và thích ứng khí hậu vào quy hoạch đô thị miền núi, theo hướng kiểm soát phát triển theo sức chịu tải và tăng cường hạ tầng tự nhiên nhằm duy trì cân bằng dài hạn.



Hình 7. Mô hình khái quát tương tác lỗi phát thải – lỗi lưu trữ các-bon và định hướng hạ tầng phát thải thấp cho đô thị miền núi Cao Bằng

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đề xuất và kiểm chứng một khung phân tích không gian có thể tái lập GEE/QGIS để lượng hóa cân bằng giữa nguồn phát thải đô thị và khu vực lưu trữ các-bon tự nhiên trong hệ đô thị miền núi Cao Bằng bằng cách tích hợp diện tích sàn xây dựng, nhiệt độ bề mặt mùa hè, tỷ lệ quá nhiệt >35°C, độ dốc và lớp phủ đất. Kết quả cho thấy một cấu trúc phân cực rõ rệt: Các trung tâm đô thị trung tâm hình thành lõi phát thải tiềm năng với diện tích sàn lớn đi kèm nền nhiệt cao và cực đoan nhiệt gia tăng, trong khi các sườn dốc và không gian rừng đóng vai trò lõi lưu trữ các-bon và điều hòa vi khí hậu. Mối tương quan mạnh giữa quy mô xây dựng, nhiệt độ nền và tỷ lệ quá nhiệt cho thấy đô thị hóa không chỉ làm tăng nhiệt nền mà còn khuếch đại rủi ro nhiệt cực đoan, trong khi địa hình dốc và che phủ sinh thái tạo hiệu ứng giảm nhiệt mang tính hệ thống. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất phân vùng ba lớp (lõi phát thải-vùng chuyển tiếp-lõi lưu trữ) để ưu tiên kiểm soát mở rộng diện tích sàn theo sức chịu tải sinh thái và tăng cường hạ tầng xanh nhằm đồng thời phục vụ giảm phát thải và thích ứng khí hậu ở đô thị miền núi.

Tài liệu tham khảo:

[1]. S. Acharya, S. Bandyopadhyay, and S. Praharaj, "Carbon Intensive Urbanization, Climate Variability and Urban Vulnerabilities in Hill Areas: A Case of Gangtok Urban Region, Sikkim" J. Int. Dev. Coop., vol. 18, no. 4, pp. 93–112, 2012.

[2]. Q. Luo, Y. Bao, Z. Wang, X. Chen, W. Wei, and Z. Fang, "Vulnerability assessment of urban remnant mountain ecosystems based on ecological sensitivity and ecosystem services" Ecol. Indic., vol. 151, p. 110314, 2023.

[3]. M. Garschagen and P. Romero-Lankao, "Exploring the relationships between urbanization trends and climate change vulnerability" Clim. Change, vol. 133, Aug. 2013.

[4]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Kết quả thực hiện Kế hoạch quốc gia thích ứng với biến đổi khí hậu năm 2024 trên địa bàn tỉnh Cao Bằng" Số 66/BC-UBND.

[5]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Tổng kết tình hình thực hiện kế hoạch phát triển kinh tế - xã hội năm 2025, phương hướng, nhiệm vụ năm 2026" Số. 4164/BC-UBND.

[6]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Quyết định về việc ban hành Kế hoạch hành động ứng phó với biến đổi khí hậu tỉnh Cao Bằng giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050" Số. 2542/QĐ-UBND.

[7]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Kế hoạch triển khai thực hiện Kế hoạch số 364-KH/TU ngày 29/8/2024 của Ban Thường vụ Tỉnh ủy Cao Bằng về thực hiện Kết luận số 81-KL/TW ngày 04/6/2024 của Bộ Chính trị về việc tiếp tục thực hiện Nghị quyết Trung ương 7 khóa XI về chủ động ứng phó với biến đổi khí hậu" Số. 414/KH-UBND.

[8]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Ứng phó với biến đổi khí hậu năm 2025 trên địa bàn tỉnh Cao Bằng" Số. 152/BC-UBND. 2026.

[9]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Kết quả thực hiện Kế hoạch quốc gia thích ứng với biến đổi khí hậu năm 2024 trên địa bàn tỉnh Cao Bằng".

[10]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Quyết định phê duyệt kết quả 'Đánh giá khí hậu tỉnh Cao Bằng'" Ủy ban nhân dân tỉnh Cao Bằng, Cao Bằng, Việt Nam, 2020.

[11]. Anon., "Đánh giá nhanh rủi ro thiên tai và biến đổi khí hậu lấy trẻ em làm trung tâm tỉnh Cao Bằng" Cao Bằng, Việt Nam, 2025.

[12]. M. Sharmin, M. Esperon-Rodriguez, L. Clackson, S. Pfautsch, and S. A. Power, "Heat Impact of Urban Sprawl: How the Spatial Composition of Residential Suburbs Impacts Summer Air Temperatures and Thermal Comfort" Atmosphere, vol. 16, no. 8, p. 899, 2025.

[13]. N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone" Remote Sens. Environ., vol. 202, pp. 18–27, 2017.

[14]. O. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.E., Xu, P., Ramoino, F., Arino, "ESA WorldCover 10 m 2021 v200" 2022.

[15]. J. A. Voogt and T. R. Oke, "Thermal remote sensing of urban climates" Remote Sens. Environ., vol. 86, no. 3, pp. 370–384, 2003.

[16]. C. B. Marsh, P. Harder, and J. W. Pomeroy, "Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment" Environ. Res. Commun., vol. 5, no. 3, p. 31009, 2023.

[17]. X. X. Zhu, S. Chen, F. Zhang, Y. Shi, and Y. Wang, "GlobalBuildingAtlas: an open global and complete dataset of building polygons, heights and LoD1 3D models" Earth Syst. Sci. Data, vol. 17, no. 12, pp. 6647–6668, 2025, doi: 10.5194/essd-17-6647-2025.

[18]. UBND tỉnh Cao Bằng, "Tổng kết tình hình thực hiện kế hoạch phát triển kinh tế - xã hội năm 2025, phương hướng, nhiệm vụ năm 2026" 2025.

[19]. Q. Weng, "Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends" ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 64, no. 4, pp. 335–344, 2009.

[20]. R. Lal, "Soil health and carbon management" Food Energy Secur., vol. 5, no. 4, pp. 212–222, Nov. 2016.

[21]. Y. Pan et al., "A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests" Science (80-.), vol. 333, no. 6045, pp. 988–993, Aug. 2011.