

Ormansızlaşma emisyonu temel metodolojilerindeki belirsizlikler ve karbon piyasalarına etkileri

Alındı: 26 Temmuz 2023

Kabul edildi: 30 Kasım 2023

Published online: 13 December 2023

Güncellemeleri kontrol edin

Hoong Chen Teo^{1,2}✉, Nicole Hui Li Tan^{1,2}, Qiming Zheng^{1,2,3},Annabel Jia Yi Lim^{1,2}, Rachakonda Sreekar^{1,2,4}, Xiao Chen^{2,5}, Yuchuan Zhou⁵, Tasya VadyaSarira^{1,2,6}, Jose Don T. De Alban^{1,2}, Hao Tang^{2,5},Daniel A. Friess^{2,5,7} & Lian Pin Koh^{1,2,5,8}✉

Yetki alanı ölçeğinde ormansızlaşmanın önlenmesi projeleri yoluyla üretilen karbon kredileri, ormansızlaşma emisyon taban çizgilerinin doğru tahmin edilmesini gerektirir, ancak bunların sağlamlığı konusunda ciddi zorluklar vardır. Dünya çapında 2.794 yargı bölgesi için tipik olarak kullanılan bir dizi yöntem ve para-metre üzerinde duyarlılık ve değişken önem analizi uygulayarak temel belirleme yöntemlerinin değişkenliğini, doğruluğunu ve belirsizliğini değerlendirdik. Medyan yargı bölgesinin ormansızlaşma emisyonu temel çizgisi, gerçek ormansızlaşma oranının 0,778 katı (%90 aralık: 0,548-3,56) medyan tahmin hatası ile ortalamasının %171'i (%90 aralık: %87-%440) kadar değişmiştir. Ayrıca, değişken önem analizi, ormansızlaşma projeksiyon yaklaşımının güçlü etkisini vurgulamıştır. Medyan yetki alanı için, olası yöntemlerin %68.0'ı (%90 aralık: %61.1-%85.6) %15 belirsizliği aşmıştır. Tropikal ve kutup biyomları karbon tahminlerinde daha büyük belirsizlikler sergilemiştir. Hassasiyet analizleri, çoklu model ve çoklu kaynak topluluğu yaklaşımlarının kullanılması değişkenlikleri ve önyargıları azaltılabilir. Bu bulgular, karbon piyasasının bütünlüğünü ve güvenini artırmak için temel tahminlerin iyileştirilmesine yönelik bir yol haritası sunmaktadır.

Orman kaybı, atmosfere salınan insan kaynaklı karbon emisyonlarının beşte birini oluşturmakta ve fosil yakıtların yanmasından sonra ikinci en büyük insan kaynaklı emisyon kaynağı haline gelmektedir⁽¹⁾ (2). Orman kaybı aynı zamanda habitatların, biyolojik çeşitliliğin ve ormanların sağladığı tozlaşma ve iklim düzenlemesi gibi ekosistem hizmetlerinin azalmasına neden olurken⁽³⁾ (4) (5), ormanlarda yaşayan toplulukların geçim kaynakları ve kültürleri için de tehdit oluşturmaktadır⁽⁶⁾ (7). Orman kaybının ek önlemler alınmazsa 5.9 Mha y⁻¹ oranında devam edeceği öngörüldüğünden⁸, ormansızlaşmanın önlenmesi iklim değişikliğinin azaltılması ve sürdürülebilir kalkınma için en önemli eylemlerden biridir.

Ormansızlaşmayı azaltmaya yönelik eylemler için mali desteği harekete geçirmenin gerekliliği iyi bilinmektedir, ancak ihtiyaç duyulan ölçekteki küresel çabalar defalarca tökezlemiştir. Başlangıçta, politik kaygılar ve teknik zorluklar, ormansızlaşmanın önlenmesine yönelik projelerin 1997 Kyoto Protokolü'nün Temiz Kalkınma Mekanizması'na dahil edilmesini engellemiştir. Bu zorluklarda ilerleme kaydetme çabaları Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) Ormansızlaşma ve Orman Bozulmasından Kaynaklanan Emisyonların Azaltılması (REDD+) pro- gramı ile sonuçlanmış ve ormansızlaşmanın önlenmesi projeleri 2013 yılında resmen kabul edilmiştir. REDD+ çerçevesi hem saha bazlı hem de saha

¹Biyolojik Bilimler Bölümü, Singapur Ulusal Üniversitesi, Singapur, Singapur. ²Doğa Temelli İklim Çözümleri Merkezi, Ulusal Üniversite

Singapur, Singapur, Singapur. ³Arazi Ölçümü ve Jeo-Enformatik Bölümü, Hong Kong Politeknik Üniversitesi, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong Özel İdari Bölgesi.

⁴Çevre Okulu, Queensland Üniversitesi, Brisbane, Queensland, Avustralya. ⁵Coğrafya Bölümü, Singapur Ulusal Üniversitesi, Singapur, Singapur. ⁶Nicholas Çevre

Okulu, Duke Üniversitesi, Durham, NC, ABD. ⁷Yer ve Çevre Bilimleri Bölümü, Tulane Üniversitesi, New Orleans, LA, ABD. ⁸Tropikal Deniz Bilimleri Enstitüsü, Singapur Ulusal Üniversitesi, Singapur, Singapur.

✉e-posta: hcteo@u.nus.edu ; lianpinkoh@nus.edu.sg

Ulusal veya ulus-altı bir idari birim genelinde geçerli olan yargı yetkisine dayalı yaklaşımlar, öncelikle gönüllü karbon piyasaları aracılığıyla faaliyet gösteren saha temelli yaklaşımlar baskın olmuştur⁹. Son yıllarda, gönüllü karbon piyasaları hızla genişleyerek

2021 yılına kadar 2 milyar \$, REDD+ projeleri ise 863 milyon \$ ile en büyük işlem hacmine sahip projelerdir¹⁰. Bununla birlikte, ormansızlaşmadan kaçınma karbon kredilerinin güvenilirliğine ilişkin endişeler bir kez daha ön plana çıkmıştır¹¹, çünkü bunların etkinliğine ilişkin çelişkili kanıtlar, emisyon azaltımlarının ve müteakip karbon kredilerinin hesaplandığı olağan senaryoyu tanımlayan ormansızlaşma emisyonu baz hatlarını tahmin etmek için kullanılan yöntemlere şüphe düştürmüştür^{(12) (13)}. Bu durum, Doğrulanmış Karbon Standardı (VCS), Orman Karbon Ortaklığı Tesisi (FCPF) ve REDD+ İşlemleri Mimarisini içeren karbon piyasası standartları için zorluklar yaratmıştır: REDD+ Çevresel Mükemmellik Standardı (ART TREES) gibi standartları da içermektedir. Güvenilirliği korumak için, karbon piyasası standartları tipik olarak muhafazakar varsayımlara sahip yöntemlerin seçilmesi ve kalıcılık, sızıntı ve belirsizlik için kesintiler yapılması gibi mekanizmalar yoluyla muhafazakar olacak şekilde tasarlanmıştır^{(14) (15)}. Aşırı tahmin edilen temel çizgiler, gerçek emisyon azaltımlarından yoksun krediler oluşturabilir ve böylece verimsiz kaynak tahsisine ile sonuçlanabilir; tersine, düşük tahmin edilen temel çizgiler ormanların korunması için yetersiz mali teşviklere neden olabilir. Dolayısıyla, temel projeksiyonlardaki belirsizliklerin ormansızlaşmanın önlenmesi planları üzerinde önemli etkileri vardır¹⁶.

Ormansızlaşmanın önlenmesi projelerinin, gönüllü karbon piyasasındaki VCS, FCPF ve ART TREES standartları gibi öngörülen yöntem ve kılavuzları izleyerek ormansızlaşma emisyon taban çizgilerini ve bunlara karşılık gelen belirsizlikleri hesaplamaları gerekmektedir (ayrıntılar için bkz. Yöntemler). Tipik olarak, ormansızlaşma emisyon taban çizgisi iki bileşenin bir ürünüdür - gelecek dönem için öngörülen ormansızlaşma oranı ve bir orman karbon tahmini. Temel belirleme yöntemleri VCS, FCPF ve ART TREES gibi çeşitli standartlar arasında genel olarak benzer olsa da, aynı standart içinde bile çok çeşitli yöntemlere, parametrelere ve veri setlerine izin verilmekte, bu da temel çizginin şişirilmesi ve kredilerin aşırı üretilmesi konusunda endişelere yol açmaktadır^{(17) (18)}. Bu aynı zamanda piyasa katılımcıları arasında standartların güvenilirliği ve daha sonra tartışılmalı hale gelen bir projede yer almanın gelecekteki potansiyel itibar riskleri konusunda kafa karışıklığına ve tereddütlere yol açmaktadır^{(12) (19)}. Bu risklerin farkında olan karbon projesi geliştiricileri, standartları elden geçirmek ve karbon kredisi bütünlüğü konusunda artan endişeleri gidermek için çalışmaktadır²⁰. Proje geliştiricileri ayrıca yetki alanı ve iç içe geçmiş REDD+ taban çizgilerine^{(21) (22)} yönelik daha güçlü bir baskı yapmaktadır; bu yaklaşım, taban çizgilerinin yetki alanı düzeyinde belirlendiği ve yetki alanındaki projelere uygulandığı veya yetki alanı içinde iç içe geçmiş saha tabanlı projelere tahsis edildiği bir yaklaşımdır. Her ne kadar yetki alanı temel çizgileri, bireysel proje geliştiricilerinin temel çizgilerini şişirmek için kasıtlı olarak metodolojik seçimler yapmasını önleyerek tutarlılığı sağlamayı amaçlasa da, yine de sahaya özgü temel çizgilerle aynı geniş metodolojik ilkeleri takip etmektedir. Bu nedenle, yargı yetkisine dayalı temel çizgiler de potansiyel olarak çok çeşitli metodolojik seçimler yapabilir ve elde edilen temel çizgilerin tutarlılığı ve doğruluğu açısından bilinmeyen sonuçlar doğurabilir.

Temel belirleme yöntemlerini geliştirerek karbon piyasası bütünlüğünün artırılmasına destek sağlamak ve karbon piyasası katılımcılarına karar alma süreçlerinde yardımcı olmak amacıyla, burada küresel ölçekte yetki alanı düzeyinde temel belirleme yöntemlerinin değişkenliğini, doğruluğunu ve belirsizliklerini değerlendiriyoruz. İlk olarak, ormansızlaşma emisyonu temel çizgilerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerin çeşitliliğini değerlendirerek, yaklaşık 4×10^9 benzersiz yöntem ve parametre kombinasyonu ürettik ve bunlar daha sonra her ulusal veya alt bölgesel yetki alanı için temel çizgileri hesaplamak için uygulandı. İkinci olarak, farklı yöntemler arasında ormansızlaşma emisyon taban çizgilerinin göreceli değişkenliğini ölçmek için duyarlılık analizi gerçekleştiriyoruz. Üçüncü olarak, farklı ormansızlaşma projeksiyon yöntemlerinin doğruluğunu tarihsel verilerle doğruluyoruz. Ayrıca, gözlemlenen göreceli değişkenliğe ve doğruluğa katkıda bulunan temel unsurları belirlemek için değişken önem analizini kullanıyoruz. Son olarak, şunları değerlendiriyoruz

Farklı ormansızlaşma projeksiyon yöntemlerine ve farklı karbon tahmin modellerine özgü belirsizlikler ve ormansızlaşma emisyon taban çizgilerindeki belirsizliklerin yayılması.

Sonuçlar

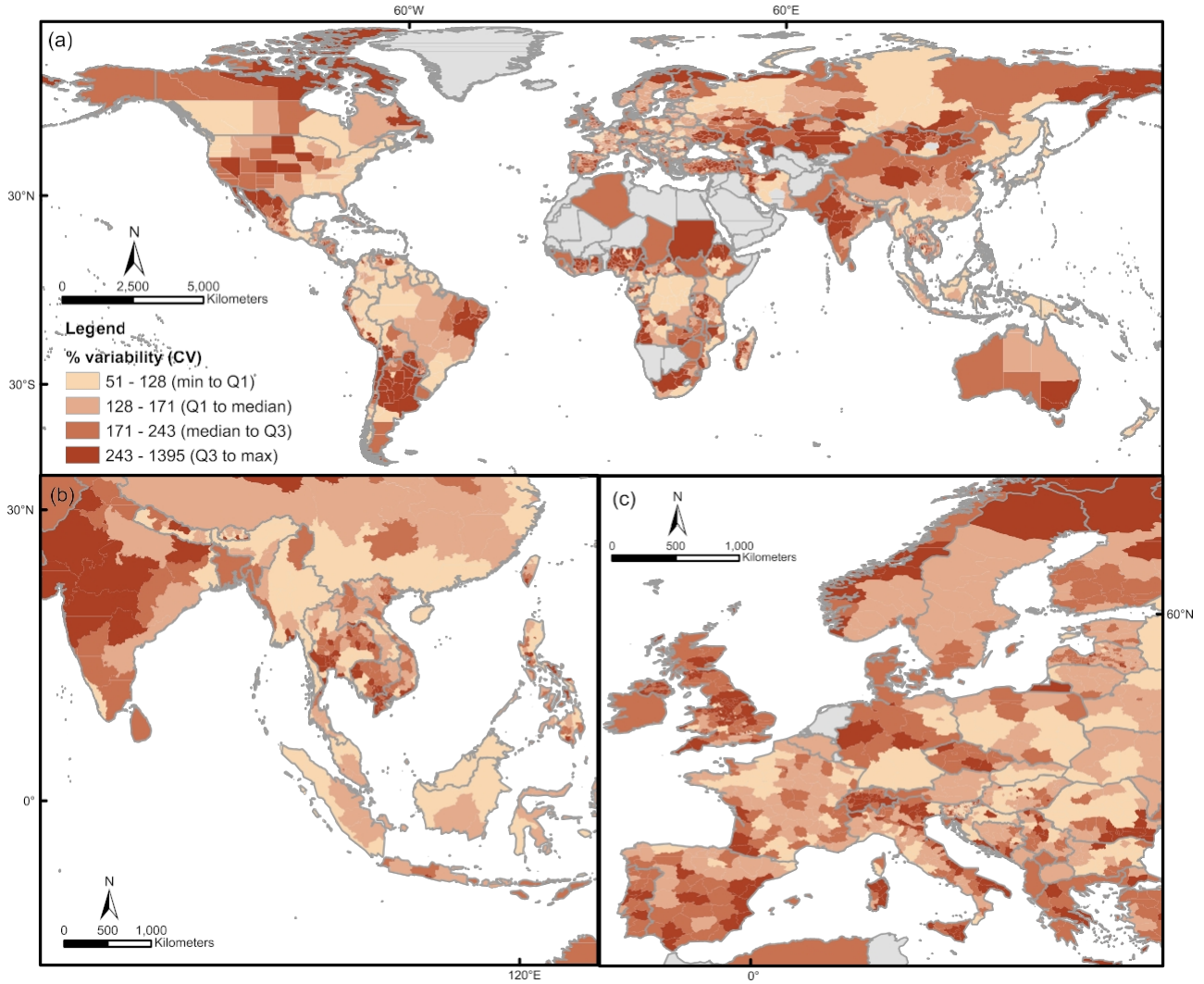
Ortalama ormansızlaşma emisyonu taban çizgilerinin göreceli değişkenliği Her bir yetki alanı için tüm yöntemlerde ormansızlaşma emisyonu taban çizgilerinin göreceli değişkenliğini (varyans katsayısı ile ölçüldüğü üzere, CV = standart sapma/ortalama) tahmin ettik (Şekil 1). Medyan değişkenlik %171'dir (%90 aralık: %87-440), yani farklı ormansızlaşma emisyonu temel belirleme yöntemlerinin kullanılması, ormansızlaşma emisyonu temel çizgilerinin medyan yetki alanı için ortalama ormansızlaşma emisyonu temel çizgisinin %171'i kadar değişmesine neden olacaktır. Yüksek göreceli değişkenliklere sahip yargı bölgeleri, yüksek orman alanı ve yüksek ormansızlaşma oranlarına sahip yargı bölgeleri de dahil olmak üzere biyomlar ve enlemler arasında bulunabilir (Şekil S1-2). Log dönüştürülmüş orman alanı ile göreceli değişkenlik arasında Pearson's $r = -0,34$ ve $p < 0,01$ (Şekil S3a) ile anlamlı bir negatif korelasyon vardı, bu da daha büyük orman alanına sahip yargı bölgelerinin genellikle temel çizgilerde daha az değişkenliğe sahip olmasına rağmen, bu değişkenliği yönlendiren başka faktörlerin de olduğunu göstermektedir.

Daha sonra, her bir parametre türünün ormansızlaşma emisyon taban çizgisini nasıl etkilediğine ilişkin değişken önemini analiz ettik (Tablo 1). Projeksiyon yaklaşımı en önemli değişken olurken, bunu ormansızlaşmayı tahmin etmek için kullanılan orman veri seti takip etmiştir. Her bir parametre türünde, her bir seviyenin göreceli değişkenliklerini (yani sadece o seviyeyi kullanan yöntemlerin olası kombinasyonlarının CV'sini) her bir yetki alanı için hesaplayıp çizdik (Şekil 2) ve hangi seviyelerin daha düşük göreceli değişkenliklere sahip olduğunu ve dolayısıyla daha tutarlı sonuçlar üreteceğini belirlemek için tek yönlü ANOVA'lar ve Tukey HSD post-hoc testleri gerçekleştirdik.

Ormansızlaşma projeksiyon yaklaşımları arasında doğrusal regresyon modelleri (*küresel*, *küresel_s*, *bölgesel* ve *bölgesel_s*; açıklama için bkz. Yöntemler) en az değişken sonuçları üretmiştir (Tablo 1, Şekil 2a); VM0015 gibi VCS standartları tarafından izin verilmesine rağmen, bunlar daha basit tarihsel ortalama (*hissr*) veya zaman fonksiyonu (*doğrusal* ve *poly2*) yöntemlerine kıyasla daha az kullanılmaktadır (Ek Veri 1). 3-11 arasında sürücü değişkenin (*global_s* ve *regional_s*) rastgele kombinasyonlarını kullanan 300 doğrusal modelin ortalamasını alan çoklu model topluluklarının, 12 sürücü değişkenin (*global* ve *regional*) tamamını kullanan karşılık gelen doğrusal modellerden önemli ölçüde daha düşük medyan göreceli değişkenliklere sahip olduğunu bulduk. Ayrıca, çoklu model toplulukları, tahminler arasındaki aykırı değerlerin yanı sıra çeyrekler arası aralığı (IQR) da azaltmaktadır. Bununla birlikte, bölgesel modeller, karşılık gelen küresel modellerden (*küresel*: %66,0, *küresel_s*: %61,0) önemli ölçüde daha yüksek medyan göreceli değişkenliklere (*bölgesel*: %70,7, *bölgesel_s*: %65,4) sahiptir.

Ormansızlaşma projeksiyonu için kullanılan orman veri setleri arasında Hansen ve diğerleri⁽²³⁾ hangi ağaç örtüsü eşliğinin kullanıldığına bakılmaksızın en az değişken sonuçları üretmiştir (Tablo 1, Şekil 2a). Hansen et al.²³ aynı zamanda bu çalışmada kullanılan en yüksek mekânsal çözünürlüğe (30 m) sahip orman veri setidir; ancak MODISⁱⁿ⁽²⁴⁾ (500 m) ESA-CCI⁽²⁵⁾ (ya300 m) göre daha az değişken sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu çalışmada 5 ila 15 yıl arasında değişen daha uzun bir tarihsel referans dönemi de medyan göreceli değişkenlikleri önemli ölçüde azaltmıştır (Tablo 1, Şekil 2b); bu da daha uzun tarihsel referans döneminin ormansızlaşma oranlarındaki stokastik değişimlerin etkisini azaltabileceğini göstermektedir.

Karbon tahmini için kullanılan farklı orman veri setlerinin (orman maskesi) kullanılması, ormansızlaşma emisyon taban çizgisinin göreceli değişkenliklerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklara sahip olsa da, post-hoc ikili karşılaştırmaların hiçbirisi istatistiksel olarak anlamlı değildi. Toprak üstü biyokütle karbonu (AGBC) için, her ikisi de küresel duvardan duvara ürünler olan Soto-Navarro vd.²⁶ ve Spawn vd.²⁷ verileri, sınırlı örnekleme izleri sağlayan Küresel Ekosistem Dinamikleri Araştırması (GEDI) ürününe göre önemli ölçüde daha az değişken sonuçlar üretmektedir²⁸. Toprak altı biyokütle karbonu (BGBC) için, Soto-Navarro ve diğerleri²⁶ en az değişken sonuçları ürettiği ve toprak organik karbonu (SOC) için hiçbir veri seti diğerinden daha az değişken sonuçlar üretmemiştir (Tablo 1).



Şekil 1 | Küresel olarak yetki alanları arasında ormansızlaşma emisyonu temellerinin göreceli değişkenliği. a Ulusal veya alt ulusal yetki alanlarının küresel haritası, her biri için ormansızlaşma emisyonu temellerinin göreceli değişkenliğini gösteren renk ile

yetki alanı. Ormansızlaşma emisyon taban çizgileri, öngörülen orman sızlaşma oranı ile yetki alanı başına CO₂e cinsinden ortalama orman karbonunun çarpımıdır. b Güney ve Güneydoğu Asya için a'nın iç kısmı. c Avrupa için a'nın iç kısmı.

Tahmin edilen ormansızlaşma oranlarının tarihsel doğruluğu

Tahmin edilen ormansızlaşma oranlarının doğruluğunu, tahmin hatasını (gerçek ve önceden tahmin edilen ormansızlaşma oranları arasındaki nispi fark) hesaplayarak değerlendirdik; bu, tarihsel referans dönemindeki ortalama ormansızlaşma oranlarını, veri mevcutsa, aynı süredeki bir sonraki dönemle karşılaştırarak elde edildi. Bu

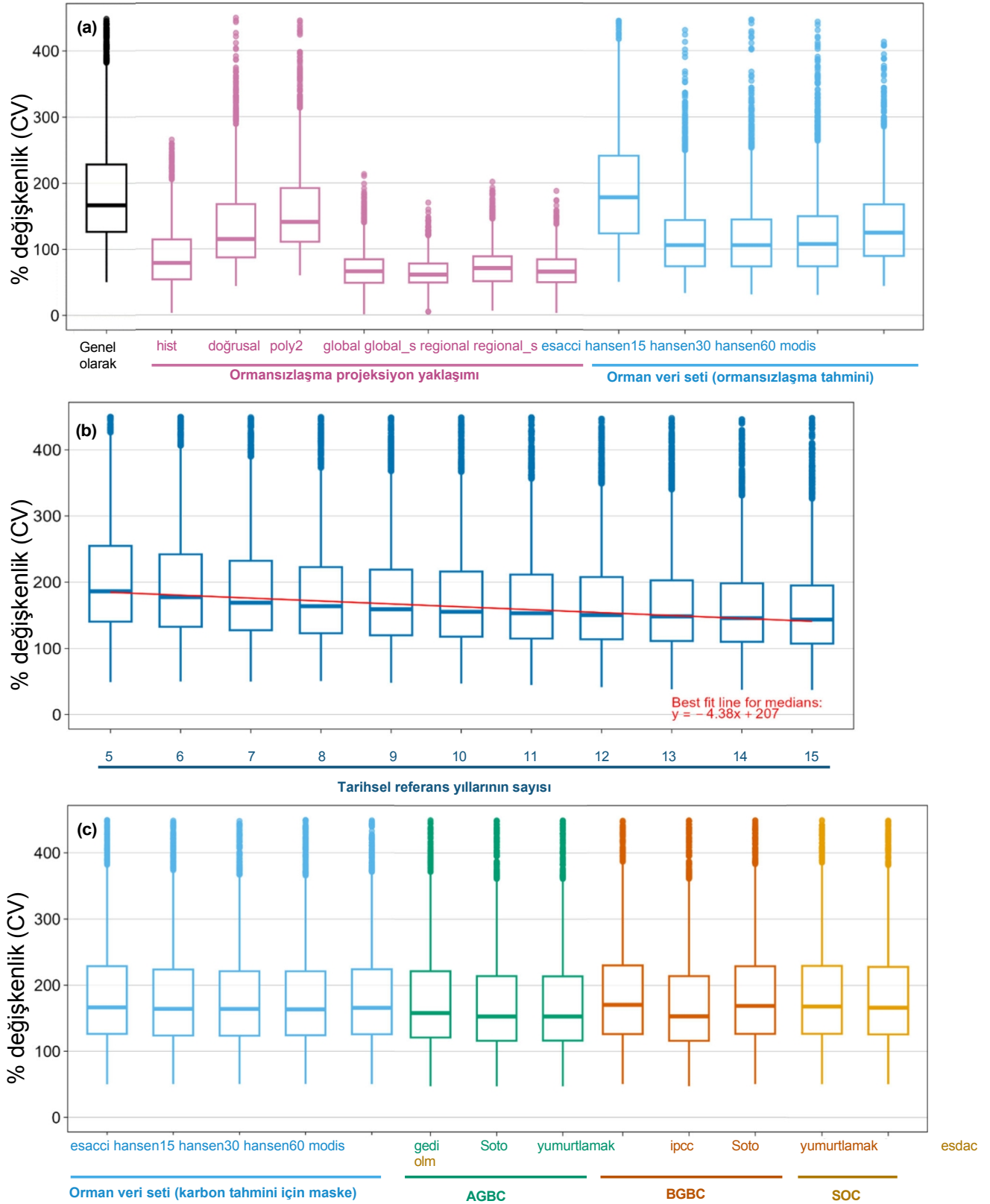
medyan yetki alanının gerçek ve ön tahmin arasındaki medyan tahmin hatası Tahmin edilen ormansızlaşma $\frac{(C - \text{gerçek})}{\text{gerçek}}$ ile hesaplanmıştır) tüm yöntemlerde 0,778 (%90 aralık: 0,548-3,56) olmuştur (Şekil 3a), yani medyan tahmin edilen ormansızlaşma gerçek ormansızlaşmadan 0,778 kat farklıdır. Her projeksiyon yaklaşımı, ormansızlaşma oranlarını ne kadar doğru tahmin ettikleri konusunda farklı spesifik değişkenliklere ve yanlışlıklara sahipti (Şekil S4), ancak belirgin bölgesel modeller yoktu. Doğrusal modeller (küresel, küresel_s, bölgesel ve bölgesel_s) için tahmin hataları diğer yaklaşımlardan önemli ölçüde daha düşüktü, ancak farklı doğrusal modeller arasında önemli bir fark yoktu.

Bununla birlikte, tüm yaklaşımların ortancası alınarak, her bir projeksiyon yaklaşımına ilişkin olan bireysel mekansal değişkenliklerin ve yanlışlıkların üstesinden gelmek mümkündür. Değişken önem ana- lizi, projeksiyon yaklaşımının doğruluğu etkileyen en önemli faktör olduğunu, bunu kullanılan orman veri setinin ve son olarak da tarihsel referans döneminin uzunluğunun izlediğini göstermiştir (Tablo 2). Doğrusal modeller

ormansızlaşmayı tahmin etmede diğer yaklaşımlara göre daha isabetlidir (Şekil 4a, S4e-S4f). Hansen ve diğerleri²⁹ tarihsel olarak en doğru orman veri setiydi. Genel olarak, tarihsel referans döneminin uzunluğunun artırılması doğruluğu artırır ve tahmin hataları için daha düşük ortalamalar ve IQR'ler ile sonuçlanır (Şekil 4).

Ormansızlaşma emisyon taban çizgileri, ormansızlaşma projeksiyonları ve karbon tahminlerindeki belirsizlikler

Ormansızlaşma projeksiyon modeli belirsizliklerini ve karbon havuzu belirsizliklerini kareleme toplamı ile yaydık (Şekil 3b-f ve 4c, d). Medyan yetki alanının yayılan belirsizliği, ormansızlaşma emisyon taban çizgisinin %29,1'i (%90 aralık: %20,8-42,6) olmuştur. Ormansızlaşma projeksiyon modeli belirsizliği (medyan %25,3; %90 aralık: %10,1-40,4) karbon belirsizliğinden (medyan %10,7; %90 aralık: %6,2-19,5) daha yüksektir. Genel belirsizlik ve ormansızlaşma projeksiyonu belirsizliği için net bir mekansal model yoktu (Şekil 3b-c), ancak karbon belirsizliği tropik bölgelerin yanı sıra kutup ve boreal bölgelerde en yüksek gibi görünmektedir (Şekil 3d); tropik bölgelerde bu esas olarak AGBC belirsizliklerinden kaynaklanırken (Şekil 3e), Kongo havzası, kutup ve boreal bölgelerde bu hem AGBC hem de BGBC belirsizliklerinden kaynaklanmaktadır (Şekil 3e, f), bu da bu bölgelerin yetersiz örneklenmesi gibi sistematik sorunlara işaret etmektedir²⁹. Gönüllü karbon piyasası standartları tipik olarak



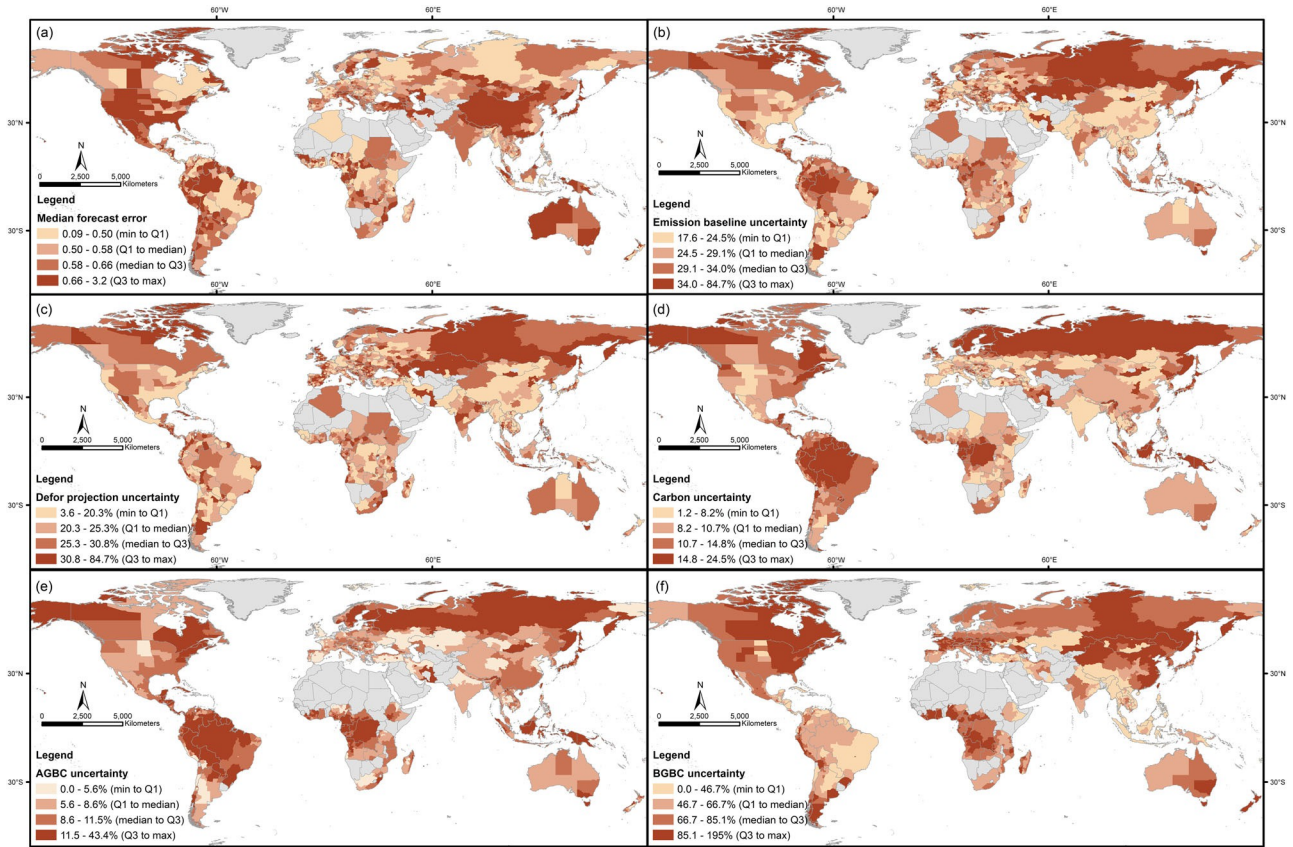
Şekil 2 | Ormansızlaşma emisyonu temel bileşenlerinin göreli değişkenliği. Farklı bileşen parametreleri için ormansızlaşma emisyonu temel çizgilerinin (her nokta bir yetki alanını temsil eder, $n = 2794$ yetki alanı için) göreli değişkenliklerinin (% CV) dağılımını gösteren kutu grafikleri (Yöntem bölümünde bu veri kümelerinin ve yöntemlerin açıklamasına bakınız): a Genel göreli değişkenlik (tüm yöntemler genelinde), her ormansızlaşma projeksiyon yaklaşımı ve her orman veri kümesi için göreli değişkenlik

ormansızlaşma projeksiyon tahminleri için kullanılmıştır. *Hist* in basit bir tarihsel ortalama, *linear* ve *poly2* 'nin zaman fonksiyonları; *global*, *global_s*, *regional* ve *regional_s* 'nin doğrusal regresyon modelleri olduğuna dikkat ediniz. b Ormansızlaşma projeksiyon tahminleri için kullanılan 5-15 olası tarihsel referans dönemi uzunluğunun her biri için göreceli değişkenlik. c Karbon tahminleri için kullanılan her orman veri setinin yanı sıra her AGBC, BGBC ve SOC veri seti için göreceli değişkenlik.

Tablo 1| Her bir parametre türünün ormansızlaşma emisyonu taban çizgisini nasıl etkilediğine dair değişken önemi ve $n = 2794$ yargı alanı için her bir parametrenin farklı seviyeleri arasındaki göreceli değişkenlikleri karşılaştıran istatistiksel testler (tek yönlü ANOVA ve Tukey's HSD post-hoc)

Parametre	Değişken Önemi		İstatistiksel testler	
	Ortalama	SE	Tek Yönlü ANOVA	Tukey's HSD post-hoc
Ormansızlaşma oranı				
Projeksiyon yaklaşımı	10.2	0.18	$F(6,19524) = 1678, p < 0.01$	<i>Global-bölgesel_s</i> ($p = 0.1$) ve <i>global_s-bölgesel_s</i> ($p = 0.07$) hariç tüm çiftler $p < 0.05$
Orman veri kümesi	4.41	0.14	$F(4,12791) = 430, p < 0.01$	Tüm çiftler $p < 0.05$, <i>hansen15-30</i> hariç ($p = 0.97$)
Tarihsel referans yılları	2.22	0.16	$F(10,30749) = 82, p < 0.01$	Tüm çiftler $p < 0.05$, 7-8, 8-9, 9-10, 9-11, 10-11, 10-12, 11-12, 11-13, 12-13, 12-14, 13-14, 13-15, 14-15 hariç.
Karbon				
Orman veri kümesi	0.74	0.04	$F(4,13565) = 2.5, p = 0.042$	Tüm çiftler $p > 0.05$.
AGB	1.31	0.04	$F(2,8379) = 8.4, p < 0.01$	<i>gedi-soto</i> & <i>gedi-spawn</i> ($p < 0.01$); <i>soto-spawn</i> ($p = 0.99$)
BGB	0.50	0.02	$F(2,8385) = 26.8, p < 0.01$	<i>ipcc-soto</i> & <i>soto-spawn</i> ($p < 0.01$); <i>ipcc-spawn</i> ($p = 0.98$)
SOC	0.23	0.02	$F(1,5594) = 0.3, p = 0.556$	<i>esdac-olm</i> ($p = 0.556$)

*Kalın harfler istatistiksel olarak anlamlı değerleri gösterir



Şekil 3| Ormansızlaşma projeksiyonlarındaki median tahmin hatası ve belirsizliği ile küresel olarak yetki alanlarındaki ormansızlaşma emisyonu temel bileşenleri.

Ulusal veya ulus-altı yetki alanlarının küresel haritaları, ortancayı gösteren renklerle

Farklı ormansızlaşma projeksiyon yaklaşımlarının tahmin hatası a, ve ormansızlaşma emisyon temellerinin median göreli belirsizliği (%90 CI) b, ormansızlaşma projeksiyonları c, karbon tahminleri d, AGBC tahminleri e, ve BGBC tahminleri f.

15'ten fazla genel belirsizliğe sahip projelere indirim uygulayabilir, hatta listelemelerini yasaklayabilir;¹⁴ karbon tahmin yöntemlerinin medianının %28,0 (%90 aralık: %20,0-60,0) her bir yetki alanı için %15 göreli belirsizliği aştığını ve ormansızlaşma projeksiyon yöntemlerinin medianının %52,9 (%90 aralık: %48,9-58,5) her bir yetki alanı için %15 göreli belirsizliği aştığını tespit ettik ve her bir yetki alanı için tüm olası yöntemler için %68,0 (%90 aralık: %61,1-85,6) yayılmış bir genel median verdik.

Tartışma

Ormansızlaşma emisyon taban çizgileri, yaygın olarak uygulanabilir yöntem ve parametreler aralığında, kullanılan yöntem ve parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Birçok gönüllü karbon standardı, Yüksek Orman Az Ormansızlaşma (HFLD) yetki alanları ve diğer durumlarda olduğu gibi, bireysel projelerin metodolojik seçimler yapmasına yönelik esneklik olarak, gerekçeli yukarı yönlü ayarlamalara da izin vermektedir^{(14) (30) (31)}. Her ne kadar bu tür bir esnekliğin aşağıdakilere izin vermesi amaçlansa da

Tablo 2| Her bir parametre türünün tahmin edilen ormansızlaşma oranlarının tahmin hatasını nasıl etkilediğine ilişkin değişken önemi ve $n=2794$ yargı alanı için her bir parametrenin farklı seviyeleri arasındaki tahmin hatalarını karşılaştıran istatistiksel testler (tek yönlü ANOVA ve Tukey HSD post-hoc)

Parametre	Değişken Önemi	İstatistiksel testler
		Tek Yönlü ANOVA
Projeksiyon yaklaşımı	Ortalama 0.12	$F(6,19424)=366, p<0.001$ tüm çiftler $p<0.01$, doğrusal modeller <i>global</i> , <i>global_s</i> , <i>regional</i> ve <i>regional_s</i> ($p=1.0$) arasında hariç
Orman veri seti	4-90 0.16	$F(4,12646)=63, p<0.001$ <i>hansen15-hansen30</i> ($p=0.70$), <i>hansen30-hansen60</i> ($p=0.07$) ve <i>hansen60-esacci</i> ($p=0.76$) arasındaki hariç tüm çiftler $p<0.05$
Tarihsel referans yılları	2-28 0.42	ANOVA $F(5,16600)=4.2548, 0.0010$, 7-10, 8-10 ($p<0.05$), diğer tüm çiftler $p>0.05$
	0.82	

*Kalın harfler istatistiksel olarak anlamlı değerleri gösterir

gerçek benzersiz yerel koşullara göre gerekli ayarlamaların yapılmaması, temel çizgilerin belirlenmesini siyasi bir yargı meselesi haline getirebilir ve bu temel çizgilerin daha sonra bağımsız olarak hatalı olduğunun değerlendirilmesi durumunda karbon piyasası katılımcılarının potansiyel güvenilirlik ve itibar risklerine maruz bırakabilir^{(12) (1) (19)}. Temel belirleme yöntemlerinin ve izin verilen parametrelerin değişkenliğini değerlendirmek için duyarlılık analizleri (çalışmamızda kullanılanlar gibi) yapmak, karbon standartlarını elden geçirme çabalarına rehberlik etmeye ve piyasa katılımcıları için şeffaflığı artırmaya yardımcı olabilir. Hassasiyet analizleri, metodolojik seçimleri gerekçelendirmek ve hesaplanan temel çizgilerin muhafazakar olmasını sağlamak için ek bir güvence olarak karbon projesi veya programı geliştiricileri için de gerekli olabilir.

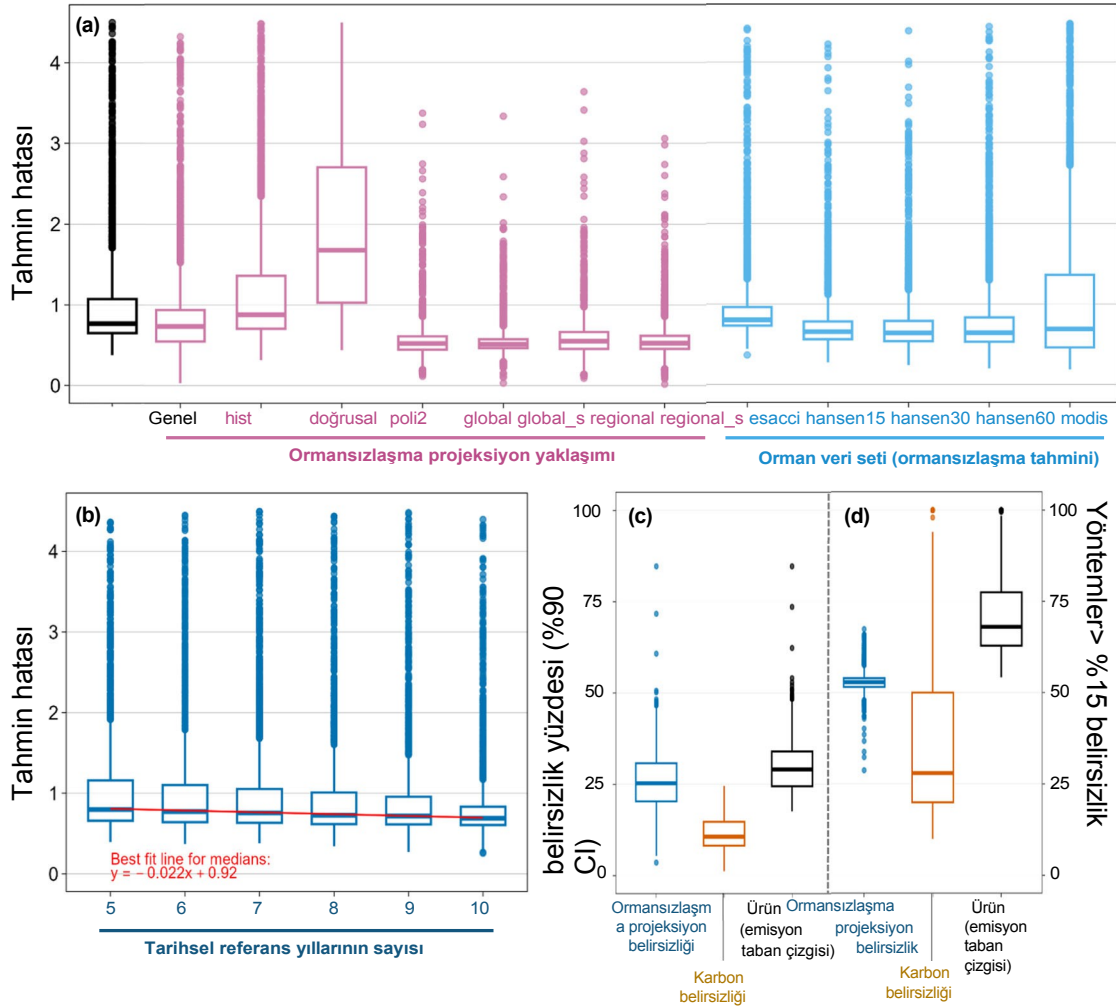
Ormansızlaşma projeksiyonlarının arkasındaki yöntemleri ve bilimi geliştirme çabalarına rağmen, ormansızlaşma oranları çeşitli stokastik politik, sosyo-ekonomik ve biyofiziksel çevresel faktörlerden etkilendiğinden, ormansızlaşma oranlarını gelecek için doğru bir şekilde tahmin etmek zor olmaya devam etmektedir^{(32) (1) (33)}. Ormansızlaşma projeksiyon yaklaşımı seçiminin temelleri üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu, çeşitli itici faktörleri içeren doğrusal regresyon modellerinin, bu tür itici faktörleri içermeyen daha basit ve daha yaygın olarak kullanılan tarihsel ortalama ve zaman fonksiyonu modellerinden daha iyi performans gösterdiğini gösterdik. Sonuçlarımız ayrıca orman veri setlerinin temelleri üzerinde ikinci en büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu farklı yaklaşımların, modellerin ve veri kaynaklarının kendilerine özgü mekansal değişkenlikleri ve yanlışlıkları olduğu göz önüne alındığında, bu değişkenliklerin ve yanlışlıkların üstesinden gelmek için çok modelli ve çok kaynaklı topluluk yaklaşımları, iklim modellemesi, hastalık modellemesi ve uzaktan algılama toplulukları gibi diğer modelleme topluluklarına benzer şekilde en iyi uygulama olarak kabul edilebilir^{(34) (1) (36)}. Bununla birlikte, gelişmiş modelleme çabaları için gereken fizibilite ve maliyetlerin yanı sıra çelişkili temellerle karşılaşıldığında daha ayrıntılı raporlama ve karar verme süreçlerine duyulan ihtiyaç, uygulamanın önündeki engeller haline gelebilir.

Çoğu yöntem ve parametre kombinasyonunda, birçok gönüllü karbon piyasası standardında tipik olarak izin verilen %15'i aşan büyük belirsizlikler bulduk; ancak gerçek proje geliştiricileri bu belirsizliklerin azaltılmasına yardımcı olabilecek ek gözlemsel verilere erişebilir. Önceki araştırmalar, ormansızlaşma temel çizgilerindeki belirsizliklerin genellikle olduğundan az tahmin edildiğini gözlemlemiştir³⁷. Çalışmamızda analiz edilen temel belirleme yöntemlerinde bu kadar büyük belirsizlikler varken, deneysel tasarımın iyileştirilmesi ve kapsamlı saha çalışması yerine istatistiksel tekniklerin etkin kullanımı gibi belirsizlikleri azaltmaya yönelik uygun maliyetli yaklaşımlar karbon piyasası ile ilgili olacaktır³⁸. Temel belirleme yöntemlerini geliştirmek için daha fazla temel bilimsel araştırma yapılabilecek birçok potansiyel alan bulunmaktadır.

Orman veri setinin, temel çizgilerdeki değişkenlikleri ve tarihsel doğruluğu etkileyen ikinci en önemli değişken olduğu göz önüne alındığında, orman ve ekosistem tanımlarının uyumlaştırılması ve alanlarının ve işlevsel değerlerinin ölçülmesine yönelik yöntemlerin iyileştirilmesi gibi orman veri setlerinin iyileştirilmesine yönelik daha fazla çalışma yapılması önemli olacaktır^{(39) (1) (42)}. Tropik bölgelerde karbon tahminindeki belirsizliklerin daha yüksek olması nedeniyle, daha yüksek kaliteli doğrulama verileri elde etme ve tropik bölgelerde daha fazla orman araştırması yapma çabaları da önemlidir. Kalıcılık ve sızıntı risklerinin nasıl izlendiği ve yönetildiğinin iyileştirilmesine yönelik daha fazla çalışmanın, hatalı ve yanlış karbon tahminlerinin etkisini de dikkate alması gerekebilir.

Çalışmamızda analiz edildiği gibi belirsiz temeller.

Karbon piyasaları, Paris İklim Anlaşması'nın⁽⁴⁸⁾ $<2^{\circ}\text{C}$ hedefine ulaşmak için uygun maliyetli iklim azaltımının üçte birini potansiyel olarak sağlayabilecek ormansızlaşmanın önlenmesi ve restorasyon projeleri gibi doğa temelli iklim çözümlerinin finansmanında önemli bir rol oynamaktadır. Analizlerimiz, ormansızlaşmadan kaçınma projeleri için temel belirleme yöntemlerinin yüksek değişkenliklere ve belirsizliklere sahip olduğunu ve doğruluk konusunda zorluklarla karşılaştığını göstermektedir; duyarlılık analizleri ve çoklu model ve çoklu kaynak topluluklarının kullanımı gibi yaklaşımlar yardımcı olabilir. Bu sonuçlar, karbon piyasası katılımcılarına karar verme sürecinde yol göstermeye yardımcı olabilir ve temel tahmin yöntemlerini iyileştirmek ve böylece karbon piyasasının bütününe ve güvenliğini artırmak için daha fazla araştırma ve uygulama için faydalı bir yol haritası sunabilir.



Şekil 4 | Ormansızlaşma emisyon taban çizgilerindeki yetki alanı tahmin hatası ve belirsizliği. Farklı bileşen parametreleri için ormansızlaşma emisyonu temel çizgilerinin (her nokta bir yetki alanını temsil eder, $n = 2.794$ yetki alanı için) yetki alanı tahmin hatası a, b dağılımını gösteren kutu grafikleri (bkz.

Yöntem bölümünde bu veri setleri ve yöntemler) ve ayrıca karbon tahmini, ormansızlaşma projeksiyon modeli ve ormansızlaşma emisyon taban çizgisi için yayılan belirsizlik için yetki alanı medyan görelî belirsizliği (%90 CI) c ve > %15 belirsizliğe sahip yöntemlerin yüzdesi d.

Yöntemler

İlk olarak, yetki alanı ve saha bazlı yaklaşımlar için proje belgelerini inceleyerek önlenen ormansızlaşma karbon kredilendirmesi için yaygın olarak kullanılan ormansızlaşma emisyonu temel belirleme yöntemlerinin çeşitliliğini değerlendirdik. Buna 30 VM0015 Doğrulanmış Karbon Standardı (VCS) projesi, 4 Plan Vivo projesi ve Ormansızlaşma ve Orman Bozulmasından Kaynaklanan Emisyonların Azaltılması (REDD+) kapsamında faaliyetleri uygulamak isteyen ülkeler tarafından Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) yapılan 55 Orman Referans Emisyon Seviyesi (FREL) başvurusu dahildir (bkz. Ek Veri 1 ve Not S1-2).

Bu değerlendirmeye dayanarak, ormansızlaşmadan kaçınılan karbon kredilendirmesinde tipik olarak izin verilen ve kullanılan para-metre ve yöntem aralığındaki tüm benzersiz kombinasyonları ($\sim 4 \times 10^9$) kullanarak her bir yetki alanı için ormansızlaşma emisyon taban çizgilerini hesaplamak için yüksek performanslı bir bilgi işlem kümesi kullandık (Tablo 3). Ormansızlaşma emisyon taban çizgileri, öngörülen ormansızlaşma oranı ile yetki alanı başına CO₂e cinsinden ortalama orman karbonunun çarpımıdır. Bu olası ormansızlaşma emisyon taban çizgileri 2794 seviye-0 ulusal yetki alanı veya seviye-1 alt ulusal yetki alanının her biri için hesaplanmıştır⁴³. Yalnızca en az 1000 km² ormana sahip ülkeler (MODIS tarafından 2001 yılı için tahmin edildiği üzere) dahil edilmiştir; 10.000 km²'den fazla ormana sahip ülkeler seviye 1 alt ulusal yetki alanlarına bölünürken, arazi alanına göre %10'dan daha az orman örtüsüne sahip alt ulusal yetki alanları hariç tutulmuştur.

Kullanılan projeksiyon yaklaşımları tipik olarak üç kategoriye ayrılır: (i) tarihsel referans dönemi için hesaplanan ortalama yıllık oranın devamı olan tarihsel ortalama; (ii) tarihsel eğilimlerin doğrusal veya lojistik regresyon kullanılarak tarihsel referans döneminden geleceğe ekstrapole edildiği zaman fonksiyonu; ve

(iii) gelecekteki ormansızlaşmayı itici değişkenlerin bir fonksiyonu olarak ifade eden bir model kullanan modelleme. Bu çalışmada tarihsel ortalama, iki tür zaman fonksiyonu (doğrusal zaman fonksiyonu ve 2nd dereceli polinom zaman fonksiyonu) ve dört set doğrusal model kullanılmıştır. Doğrusal modellerde, yanıt değişkeni (ormansızlaşma oranı) box-cox dönüşümüne tabi tutulmuş ve aykırı değerler çıkarılmıştır. Ormansızlaşmayı tahmin etmek için biyofiziksel ve sosyoekonomik ortak değişkenler (Tablo 4, kısa açıklama ve gerekçe Not S3'te) olan ve küresel ölçekte yaygın olarak kullanılan mekansal ürünlerden türetilen 12'ye kadar açıklayıcı sürücü değişken vardı. Bu çalışmada, uzaktan algılanan ağaç örtüsü kaybı veya orman kaybının ormansızlaşma ile eş anlamlı olarak kabul edildiğini unutmayın; tüm veri kümeleri arasında tutarlılık sağlamak için orman kazancı veya orman yenilenmesi dahil edilmemiştir. Bu mekansal veri setleri Google Earth Engine'de Mollweide eşit alan projeksiyonu kullanılarak işlenmiştir. Daha sonra, istatistiksel modelleme ve hesaplamalar R sürüm 4.0.2'de 'MASS' v7.3-51.6', 'dplyr' v1.1.2 istatistik paketleri ve 'foreach' v1.5.0 ve 'doParallel' v1.0.15 paralelleştirme paketleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değişkenleri belirlemek için çift yönlü aşamalı eleme gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3| Bu çalışmada kullanılan parametreler ve yöntem aralığı, veri kaynakları ve değerler

Parametre	Bu çalışmada kullanılan yöntem, veri kaynağı ve değer aralığı
Projeksiyon yaklaşımı	Tarihsel ortalama Doğrusal zaman fonksiyonu 2 nd dereceli polinom zaman fonksiyonu Global doğrusal model (12 sürücü değişkenin tümü; bkz. Tablo 4) Global doğrusal model (sürücü değişkenlerin 3-11 rastgele kombinasyonunun 300 tekrarı) Bölgesel doğrusal model (12 sürücü değişkenin tümü; bkz. Tablo 4) Bölgesel doğrusal model (sürücü değişkenlerin 3-11 rastgele kombinasyonunun 300 tekrarı)
Orman veri kümesi	Avrupa Uzak Ajansı İklim Değişikliği Girişimi Arazi Örtüsü (ESA CCI-LC) 300 m arazi örtüsü, ağaç örtüsünün > %15 olduğu 50-90 ve 160-170 arazi örtüleri ile tanımlanan orman ⁽²⁵⁾ . Her yıl için orman örtüsü, yalnızca orman kaybına izin vermek için bir önceki yıla kırpılmıştır. Hansen Küresel Orman Değişimi 30 m, ağaç örtüsü ile tanımlanan orman > %15 ²³ Hansen Küresel Orman Değişimi 30 m, ağaç örtüsü ile tanımlanan orman > %30 ²³ Hansen Küresel Orman Değişikliği 30 m, ağaç örtüsü ile tanımlanan orman > %60 ²³ MODIS MCD12Q1.061 arazi örtüsü 500 m, ağaç örtüsünün > %60 olduğu Tip 1 (Uluslararası Jeosfer Biyosfer Programı sınıfları) sınıflandırması altında 1-6 arazi örtüleri ile tanımlanan orman ²⁴ . Her yıl için orman örtüsü, yalnızca orman kaybına izin vermek için bir önceki yıla kırpılmıştır.
Tarihsel referans yılları	5-15 yıl
Başlangıç yılı	2000-2021 (Hansen) 2001-2020 (MODIS) 1992-2020 (ESA-CCI)
Toprak üstü biyokütle (AGB)	Spawn ve diğerleri ²⁷ , 300 m Küresel Ekosistem Dinamikleri Araştırması (GEDI) L4B ²⁸ , 25 m Soto-Navarro ve diğerleri ²⁶ , 300 m
Toprak altı biyokütle (BGB)	Spawn ve diğerleri ²⁷ , 300 m Soto-Navarro ve diğerleri ²⁶ , 300 m Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) BGB oranları ⁽⁴⁵⁾
Toprak organik karbonu (SOC)	Avrupa Toprak Veri Merkezi (ESDAC) ⁴⁶ , 30 yay saniyesi OpenLandMap ⁴⁷ , 250 m

Tablo 4| Biyofiziksel, sosyoekonomik ve arazi örtüsü açıklayıcı değişkenleri için veri kaynakları ve işleme yöntemleri

Değişken	Veri kaynağı ve işleme yöntemleri
Yükseklik	Shuttle Radar Topography Mission'dan (SRTM) alınan boşluk dolu sayısal yükseklik verileri ⁴⁸
Eğim	
Uzun vadeli ortalama yıllık sıcaklık	WorldClim BIO Değişkenleri V1 ⁴⁹
Uzun vadeli ortalama yıllık yağış	
Satın alma gücü paritesine (PPP) göre düzeltilmiş küresel gridlenmiş kişi başına Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH)	1992-2015 yılları için çıkarılmıştır; 2015'ten sonraki yıllar için, daha yeni verilerin mevcut olmaması nedeniyle 2015 verileri kullanılmıştır ⁵⁰
İnsani Gelişme Endeksi	
Ortalama gece ışığı yoğunluğu	Ortalama gece ışığı yoğunluğu 1992-2013 yılları için tutarlı ve düzeltilmiş DMSP-OLS verilerinden çıkarılmıştır; VIIRS gece ışığı verileri 2012-2020 yılları için çıkarılmış ve Li ve diğerleri ⁵¹ ve Teo ve diğerleri ⁵² yöntemine göre DMSP-OLS ile kalibre edilmiştir. Hem VIIRS hem de DMSP-OLS'yi 1 km çözünürlüğe kadar mekansal olarak toplayarak, zamansal olarak örtüşen mozaikler için güç regresyon modelleri oluşturarak ve tüm VIIRS görüntülerini kalibre etmek için elde edilen katsayıların ortalamasını kullanarak ^{(53) (54)} .
Nüfus yoğunluğu	Küresel İnsan Yerleşimi Katmanından (GHS-L) 1992-2020 yılları için çıkarılmıştır ⁽⁵⁵⁾
Orman alanı yüzdesi	Tablo 3'te açıklandığı gibi orman veri setlerinden türetilmiştir.
Tarımsal alan yüzdesi	Orman veri setleriyle tutarlılık için, orman örtüsü için ESA CCI-LC'nin kullandığı ESA CCI-LC'den 10 ve 20 numaralı arazi örtüsü sınıflarını; orman örtüsü için Hansen Global Forest Change'in kullandığı Global Food Security-Support Analysis Data'yı (GFSAD ⁵⁶); ve orman örtüsü için MODIS'in kullandığı MODIS MCD12Q1.061 arazi örtüsü sınıfı 12'yi kullandık.
Madencilik arazi kullanımları tarafından işgal edilen arazi alanının yüzdesi	2019'da madencilik yapılan alanların genellikle ormansızlaşma için bir teşvik oluşturan kolay erişilebilir ve bilinen maden yataklarına sahip alanları temsil ettiği ve ayrıca madencilik altyapısının onlarca yıl kalma eğiliminde olduğu varsayımına dayanarak 2019 yılı için çıkarılmış ve tüm yıllara uygulanmıştır ⁵⁷ .
Ağaç plantasyonları tarafından işgal edilen arazi yüzdesi	Ağaç plantasyonları doğal ormanlardan farklıdır ve palmye yağı, kahve veya hindistan cevizi gibi ağaç mahsullerinden veya odun üretimi için yetiştirilen dikili ormanlardan oluşabilir. 1992-2020 yılları için küresel plantasyon dikim yılları haritasından çıkarılmıştır ⁵⁸ .

en iyi model uyumunu yaratmıştır. Bir dizi küresel model çalıştırılmıştır: ilk doğrusal model 12 açıklayıcı sürücü değişkenin tamamını kullanırken (aşamalı elemelerden önce), ikinci doğrusal model bu açıklayıcı sürücü değişkenlerin 3-11 rastgele kombinasyonunun 300 tekrarının ortalamasıdır. Daha sonra, bu doğrusal modeller dünyanın altı bölgesi için ayrı ayrı tekrarlanmıştır: Afrika, Asya, Okyanusya, Latin Amerika, Kuzey Amerika ve Avrupa. Çalışmamızdaki bu yedi projeksiyon yaklaşımı daha sonra öngörülen ormansızlaşma oranını elde etmek için farklı orman veri setlerinin tüm olası kombinasyonları, tarihsel referans yıllarının sayısı ve mevcut yıl aralığı için uygulanmıştır. Sadece negatif olmayan öngörülen ormansızlaşma değerleri korunmuştur, çünkü negatif öngörülen ormansızlaşma değerleri üreten yöntemler gerçek taban çizgilerinde muhtemelen reddedilecektir.

Yetki alanı başına CO₂e cinsinden ortalama orman karbonu, çeşitli toprak üstü biyokütle (AGB), toprak altı biyokütle (BGB) ve toprak organik karbon (SOC) veri setlerinden tahmin edilmiştir. Bu mekansal veri kümeleri Google Earth Engine'de Mollweide eşit alan projeksiyonu kullanılarak işlenmiştir. Tüm biyokütle 0,47 stok kiometrik faktör ile karbon stokuna, ardından 3,67 molar kütle dönüşüm faktörü ile karbondioksit eşdeğeri emisyonlara (CO₂)_e dönüştürülmüştür. Toprak altı karbon havuzu için 10 yıllık muhafazakar bir çürüme tahmini varsayılmıştır⁴⁴.

Belirsizlikler, ART TREES metodolojisi³⁰ ve IPCC konvansiyonu¹ doğrultusunda, modellerden %90 tahmin aralıkları çıkarılarak zaman fonksiyonu ve doğrusal modellerden türetilmiştir. Karbon havuzları için belirsizlikler, mevcut olduğunda veri sağlayıcıdan türetilmiş veya IPCC varsayılanı olan %33 kullanılmıştır. Son olarak, bu belirsizlikler kareleme toplamı ile yayılmıştır.

Son olarak, değişken önemi, R paketi 'ranger' v0.13.1'de rastgele orman makine öğrenimi modelleri kullanılarak, yanıt değişkeni olarak ormansızlaşma emisyon taban çizgileri ve açıklayıcı değişkenler olarak parametre türü ile değerlendirilmiştir. Hesaplama verimliliğini artırmak için, her biri 200 ağaçlı 100 rastgele orman modeli ve her rastgele orman modeli 900.000 satırlık rastgele bir örneklem olarak önyüklemeyi yaptık.

Veri kullanılabilirliği

Bu çalışma tarafından üretilen tüm veriler, el yazması ve eklerin yanı sıra Figshare deposunda (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24597315>) yer almaktadır.

Referanslar

- Shukla, P. R. ve diğerleri. AR6 İklim Değişikliğinin Azaltılması: Politika Yapıcılar için Özet. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- van der Werf, G. R. ve diğerleri. Orman kaybindan kaynaklanan CO₂ emisyonları. *Nat. Geosci.* 2, 737-738 (2009).
- Giam, X., Bradshaw, C. J. A., Tan, H. T. W. & Sodhi, N. S. Gelecek habitat kaybı ve bitki biyoçeşitliliğinin korunması. *Biol. Con- serv.* 143, 1594-1602 (2010).
- Sarira, T. V., Zeng, Y., Neugarten, R., Chaplin-Kramer, R. & Koh, L. P. Güneydoğu Asya'daki orman karbon projelerinin ortak faydaları. *Nat. Sus- tain.* 5, 393-396 (2022).
- Teo, H. C. ve diğerleri. Büyük ölçekli yeniden ağaçlandırma, su verimini artırabilir ve Asya- Pasifik'teki su açısından güvensiz bölgeler için kuraklık riskini azaltabilir. *Glob. Change Biol.* 28, 6385-6403 (2022).
- Haenssger, M. J. ve diğerleri. Orman kaybını durdurmaya yönelik COP26 deklarasyonunun uygulanması Yerli halkı korumalı ve içermelidir. *Nat. Ecol. Evol.* 63, 235-236 (2022).
- Mabasa, M. A. & Makhubele, J. C. Ormansızlaşmanın thulamela yerelinin düşük kaynaklara sahip bölgelerinde sus- tainable livelihoods üzerindeki etkisi. *Belediye: Implic. Uygulama. J. Hum. Ecol.* 55, 173-182 (2017).
- Griscom, B. W. ve diğerleri. Doğal iklim çözümleri. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 114, 11645-11650 (2017).
- Laing, T., Taschini, L. & Palmer, C. REDD+ kredilerine olan talebi anlamak. *Çevre Koruma. Conserv.* 43, 389-396 (2016).
- Donofrio, S., Maguire, P., Daley, C., Calderon, C. & Lin, K. *Gönüllü Karbon Piyasaları 2022 Q3*. (2022).
- Balmford, A. ve diğerleri. Kredi güvenilirliği ormanları tehdit ediyor. *Bilim* 380, 466-467 (2023).
- West, T. A. P., Börner, J., Sills, E. O. & Kontoleon, A. Brezilya Amazonları'ndaki gönüllü REDD+ projelerinin abartılı karbon emisyonu azaltımları. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 117, 24188-24194 (2020).
- Guizar-Coutiño, A. ve diğerleri. Nemli tropik bölgelerde ormansızlaşma ve bozulmayı azaltmada gönüllü REDD+ projelerinin etkinliğinin küresel değerlendirmesi. *Conserv. Biol.* 36, e13970 (2022).
- Chagas, T., Galt, H., Lee, D., Neeff, T. & Streck, C. *REDD+ karbon kredilerinin kalitesine yakından bir bakış*. (2020).
- Grassi, G., Monni, S., Federici, S., Achard, F. & Mollicone, D. Tahminlerdeki belirsizliklerle başa çıkmak için tutuculuk ilkesinin REDD'e uygulanması. *Environ. Res. Lett.* 3, 035005 (2008).
- Friess, D. A. & Webb, E. L. Mangrov değişim tahminlerindeki değişkenlik ve ekosistem hizmeti sunumunun değerlendirilmesi için çıkarımlar. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23, 715-725 (2014).
- Mertz, O. ve ark. REDD+ için orman referans seviyelerinin belirlenmesinde ve gelecekteki orman bazı karbon stoklarının tahmininde belirsizlik. *J. Land Use Sci.* 13, 1-15 (2017).
- Rifai, S. W., West, T. A. P. & Putz, F. E. 'Karbon Kovboyları' pozitif Ölçüm yanlılığı yoluyla REDD+ ödemelerini şişirebilir. *Carbon Manag.* 6, 151-158 (2015).
- Greenfield, P. Ortaya çıktı: En büyük sertifikalandırıcı tarafından yapılan yağmur ormanı karbon denkleştirmelerinin %90'ından fazlası değersiz, analiz gösteriyor. *Guar- dian* (2023).
- Verra. Verra, VCS Programında Yapılması Önerilen Değişiklikler Hakkında İstişare Başlattı. (2023).
- Ehara, M. ve diğerleri. REDD+ ulusal taban çizgisinin yerel projelere tahsisi: Kamboçya örneği. *Policy Econ.* 129, 102474 (2021).
- Irawan, S., Widiastomo, T., Tacconi, L., Watts, J. D. & Steni, B. Yargı yetkisine dayalı REDD+ tasarımının araştırılması: Orta Kalimantan, Endonezya örneği. *Policy Econ.* 108, 101853 (2019).
- Hansen, M. C. ve diğerleri. 21. yüzyıl orman örtüsü değişiminin yüksek çözünürlüklü küresel haritaları. *Science* 342, 850-853 (2013).
- Friedl, M. & Sulla-Menashe, D. MCD12C1 MODIS/Terra+ Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05 Deg CMG V006 [veri seti]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC* (2015) <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.061>.
- Defourny, P. ve ark. 1992'den 2020'ye kadar gözlemlenen yıllık küresel arazi kullanım değişikliği, envanter tabanlı istatistiklerin bildirdiğinden üç kat daha dinamik. *Hazırlık*. (2023).
- Soto-Navarro, C. ve diğerleri. Koruma politikası ve eylemini bilgilendirmek için karbon depolama ve biyoçeşitlilik için ortak faydaların haritalanması. *Philos. Trans. R. Soc. B* 375, 20190128 (2020).
- Spawn, S. A., Sullivan, C. C., Lark, T. J. & Gibbs, H. K. 2010 yılında toprak üstü ve altı biyokütle karbon yoğunluğunun uyumlu hale getirilmiş küresel haritaları. *Sci. Data* 2020 71 7, 1-22 (2020).
- Dubayah, R. O. ve diğerleri. *GED1 L4B Gridded Aboveground Biomass Density, Version 2* [veri seti]. (ORNL DAAC, 2022).
- Duncanson, L. ve diğerleri. Tutarlı Küresel Orman Toprak Üstü Biyokütle Ürün Doğrulamasının Önemi. *Surv. Geophys.* 40, 979-999 (2019).
- ART Sekreteryası. *REDD+ Çevresel Mükemmellik Standartları (TREES), Sürüm 2.0*. (2021).
- Verra. *VM0007 REDD+ METODOLOJİ ÇERÇEVESİ (REDD+MF), V1.6*. (2020).
- Hewson, J., Crema, S. C., González-Roglich, M., Tabor, K. & Harvey, C. A. Ağaç örtüsü kaybının küresel ve bölgesel risklerine ilişkin yeni 1 km çözünürlüklü veri setleri. *Land* 8, 14 (2019).
- Teo, H. C., Campos-Arceiz, A., Li, B. V., Wu, M. & Lechner, A. M. Yeşil bir Kuşak ve Yol inşa etmek: sistematik bir inceleme ve

- Çince ve İngilizce edebiyatın karşılaştırmalı değerlendirilmesi- erature. *PLOS ONE* 15, e0239009 (2020).
34. Zhang, J. Çok kaynaklı uzaktan algılama veri füzyonu: durum ve eğilimler. *Int. J. Image Data Fusion* 1, 5-24 (2010).
35. Tebaldi, C. & Knutti, R. Olasılıksal iklim projeksiyonlarında çoklu model topluluğunun kullanımı. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 365, 2053-2075 (2007).
36. Reich, N. G. ve diğerleri. ABD'de mevsimsel grip için gerçek zamanlı çoklu model topluluğu tahminlerinin doğruluğu *PLOS Comput. Biol.* 15, e1007486 (2019).
37. Yanai, R. D. ve diğerleri. REDD+ azaltım çabaları için orman karbon muhasebesinde belirsizliğin iyileştirilmesi. *Environ. Res. Lett.* 15, 124002 (2020).
38. Emick, E. ve diğerleri. Tahmin belirsizliğini ölçerken ve makinedeki yanlışlığı düzeltirken orman biyokütlesini tahmin etmeye yönelik bir yaklaşım öğrenme haritaları. *Uzaktan Algılama. Environ.* 295, 113678 (2023).
39. Friess, D. A. & Webb, E. L. Kötü veri eşittir kötü politika: Bu kadar belirsizlik varken ekosistem kaybı tahminlerine nasıl güvenebiliriz? *Çevre Koruma. Conserv.* 38, 1-5 (2011).
40. Sexton, J. O. ve diğerleri. Koruma politikası ve ormanların ölçümü. *Nat. Clim. Change* 62, 192-196 (2015).
41. Grainger, A. tropikal orman alanındaki uzun vadeli küresel eğilimin izlenmesindeki zorluklar. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105, 818-823 (2008).
42. Sandker, M. ve diğerleri. REDD+ için Yüksek Kaliteli Verilerin Önemi İzleme ve Raporlama. *Forests* 12, 99 (2021).
43. Natural Earth. <https://www.naturalearthdata.com/> (2019).
44. VCS. Tarım, Ormancılık ve Diğer Arazi Kullanımı (AFOLU) Gereklilikleri-ments. *VCS Sürüm 3* (2017).
45. Domke, G. ve diğerleri. 4. Bölüm: Orman Arazisi. 2006 *IPCC Ulusal Sera Gazı Envanterleri Kılavuzunun 2019'da Geliştirilmesi Cilt 4: Tarım, Ormancılık ve Diğer Arazi Kullanımı* (2019).
46. Panagos, P. ve diğerleri. Avrupa Toprak Veri Merkezi 2.0: AB politikalarını desteklemek için toprak verileri ve bilgisi. *Eur. J. Soil Sci.* 73, e13315 (2022).
47. Hengl, T. & Wheeler, I. Toprak organik karbon içeriği. <https://zenodo.org/record/2525553> (2018).
48. Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. & Guevara, E. Dünya için delikli SRTM Sürüm 4. *CGIAR-CSI SRTM 90m Veritabanı* <https://srtm.csi.cgiar.org> (2008).
49. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. & Jarvis, A. Küresel kara alanları için çok yüksek çözünürlüklü enterpolasyonlu iklim yüzeyleri. *Int. J. Climatol.* 25, 1965-1978 (2005).
50. Kumm, M., Taka, M. & Guillaume, J. H. A. Gayrisafi yurtiçi hasıla ve insani gelişme endeksi için 1990-2015 üzerinden gridlenmiş küresel veri setleri. *Sci. Data* 5, 1-15 (2018).
51. Li, X., Li, D., Xu, H. & Wu, C. Suriye İç Savaşı sırasında Suriye'nin büyük insan yerleşiminin şehir ışık dinamiklerini değerlendirmek için DMSP/OLS ve VIIRS gece ışık görüntüleri arasında interkalibrasyon. *Int. J. Remote Sens.* 38, 5934-5951 (2017).
52. Teo, H. C., Lechner, A. M., Sagala, S. & Campos-Arceiz, A. Planlanan başkentlerin çevre üzerindeki etkileri ve Endonezya'nın yeni başkenti için dersler. *Land* 9, 438 (2020).
53. Zhao, C., Cao, X., Chen, X. & Cui, X. DMSP-OLS verilerinden tutarlı ve düzeltilmiş bir gece ışık veri seti (CCNL 1992-2013). *Sci. Data* 9, 1-12 (2022).
54. Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C. & Ghosh, T. VIIRS gece ışıkları. *Int. J. Remote Sens.* 38, 5860-5879 (2017).
55. Liu, X., de Sherbinin, A. & Zhan, Y. VIIRS gece ışığı ve MODIS gündüz NDVI verileri ile makine öğrenimi yöntemleri kullanarak büyük mekansal ölçeklerde kentsel kapsamın haritalanması. *Uzaktan Algılama* 11, 1247 (2019).
56. Oliphant, A., Thenkabail, P. & Teluguntla, P. 30 m çözünürlükte küresel gıda güvenliği destek analizi verileri (GFSAD30) ekili alan kapsamı ürünleri. (2022) <https://doi.org/10.3133/ofr20221001>.
57. Maus, V. ve diğerleri. Küresel madencilik arazi kullanımı hakkında bir güncelleme. *Sci. Data* 91, 1-11 (2022).
58. Du, Z. ve ark. Tarlaların ekim yıllarının küresel bir haritası. *Bilim Verileri* 91, 1-9 (2022).

Teşekkür

L.P.K. Singapur Ulusal Araştırma Vakfı (NRF-RSS2019-007) ve Singapur Ulusal Araştırma Fonu ve Bilim, Teknoloji ve Araştırma Ajansı LCER Faz 2 finansman programı (U2303D4101) tarafından desteklenmektedir. H.T. Singapur Eğitim Bakanlığı tarafından desteklenmektedir (MOE-T2EP50122-0006). T.V.S. MAC3 Impact Philanthropies tarafından desteklenmektedir. Q.Z. Hong Kong Politeknik Üniversitesi Stratejik İşe Alım Programı Fonu (P0044791) tarafından desteklenmektedir.

Yazar katkıları

H.C.T., L.P.K., D.A.F., H.T. çalışmayı tasarlamıştır. L.P.K., D.A.F., H.T. çalışmayı denetlemiştir. H.C.T. analizleri yürütmüş ve yazımı yönetmiştir. N.H.L.T. literatür taraması ve veri toplama işlemlerini gerçekleştirmiştir. Tüm yazarlar (H.C.T., N.H.L.T., Q.Z., A.J.Y.L., R.S., X.C., Y.Z., T.V.S., J.D.T.D.A., H.T., D.A.F., L.P.K.) metodolojilerin tasarlanması, yazılması ve düzenlenmesine katkıda bulunmuştur.

Rekabet eden çıkarlar

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Ek bilgi

Ek bilgi Çevrimiçi versiyon, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44127-9> adresinde bulunan ek materyalleri içermektedir.

Yazışmalar ve materyal talepleri Hoong Chen Teo veya Lian Pin Koh'a gönderilmelidir.

Hakem değerlendirmesi bilgileri *Nature Communications*, bu çalışmanın hakem değerlendirmesine katkılarından dolayı Peter Elsasser ve Xi Li'ye teşekkür eder. Hakem değerlendirme dosyası mevcuttur.

Yeniden basım ve izin bilgilerine <http://www.nature.com/reprints> adresinden ulaşılabilir.

Yayıncının notu Springer Nature, yayınlanan haritalardaki hukuki iddialar ve kurumsal bağlantılar konusunda tarafsız kalmaktadır.

Açık Erişim Bu makale, orijinal yazar(lar)a ve kaynağa uygun şekilde atıfta bulunduğunuz, Creative Commons lisansına bir bağlantı verdiğiniz ve değişiklik yapıp yapılmadığını belirttiğiniz sürece, herhangi bir ortam veya formatta kullanım, paylaşım, uyarlama, dağıtım ve çoğaltmaya izin veren Creative Commons Attribution 4.0 Uluslararası Lisansı altında lisanslanmıştır. Bu makalede yer alan görseller veya diğer üçüncü taraf materyalleri, aksi belirtilmediği sürece, makalenin Creative Commons lisansına dahildir. Materyal, makalenin Creative Commons lisansına dahil değilse ve kullanım amacınız yasal düzenlemeler tarafından izin verilmiyorsa veya izin verilen kullanımı aşıyorsa, doğrudan telif hakkı sahibinden izin almanız gerekecektir. Bu lisansın bir kopyasını görüntülemek için <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> adresini ziyaret edin.

© Yazar(lar) 2023