

# ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ДИНАМИКУ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ОДНОРОДНОМ РЕЖИМЕ ОСАДКОВ: МУЛЬТИСАЙТОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В НИГЕРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SOILGRIDS И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**Н.О. Нвоби**

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия.

Эл. почта: [nvobi\\_n@pfur.ru](mailto:nvobi_n@pfur.ru)

Статья поступила в редакцию 19.10.2025; принята к печати 12.11.2025

Изучено влияние свойств почв на предрасположенность к овражной эрозии в трёх различных геоморфологических районах Нигерии: на плато Абуджа, в холмистой области Иданре и в бассейне Огун-Ошун. Все указанные территории находятся в зоне однородного режима осадков. С помощью метода классификации «случайный лес» (*Random Forest*, RF) и почвенных характеристик, извлечённых исключительно из базы данных SoilGrids, проведён анализ того, как физико-химические свойства почв формируют пространственные различия в развитии оврагов. Динамика оврагообразования за период с 2000 по 2025 год демонстрирует существенное расширение овражной сети на всех участках: общая площадь оврагов увеличилась более чем на 500% в бассейне Огун-Ошун и на плато Абуджа. Среди оценённых почвенных параметров ключевыми предикторами возникновения оврагов оказались содержание песка, содержание глины, соотношение песка и глины. Эти переменные показали наибольшие значения важности признаков (0,15–0,27). Почвенный органический углерод (SOC) также внес умеренный вклад в качество модели, что указывает на его стабилизирующее влияние на структуру почвы. Модели RF продемонстрировали высокую прогностическую точность ( $F1\text{-score} = 0,88$ ;  $AUC = 0,79$ ), подтвердив надёжность прогнозирования на основе гранулометрического состава почв в гетерогенных ландшафтах. Анализ пространственной изменчивости и неопределенности показал, что паттерны предрасположенности к оврагообразованию в большей степени определяются неоднородностью гранулометрического состава, а не систематической ошибкой модели. В целом результаты исследования свидетельствуют о том, что почвы с более грубым гранулометрическим составом и низким содержанием почвенного органического углерода (SOC) сильнее подвержены образованию оврагов. Это подчёркивает необходимость целенаправленной охраны почв и управления растительным покровом в бассейнах, склонных к эрозии. Работа подтверждает ключевую роль состава почв в формировании динамики оврагообразования и предлагает основанную на данных методологическую рамку для снижения регионального риска эрозии.

**Ключевые слова:** овражная эрозия, свойства почв, SoilGrids, Нигерия, дистанционное зондирование, эродируемость почв, геоинформационные системы

## SOIL CONTROLS OF GULLY EROSION DYNAMICS IN CONDITIONS OF UNIFORM RAINFALL REGIMENS: A MULTI-SITE STUDY IN NIGERIA USING SOILGRIDS AND REMOTE SENSING

**N.O. Nwobi**

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Email: [nvobi\\_n@pfur.ru](mailto:nvobi_n@pfur.ru)

This study investigates the influence of soil properties on gully erosion susceptibility across three distinct geomorphic settings in Nigeria: the Abuja Plateau, the Idanre Hills, and the Ogun-Oshun Basin, all of which are located under a uniform rainfall regime. Using Random Forest (RF) classification and soil attributes derived exclusively from the SoilGrids database, the analysis evaluates how physicochemical soil characteristics shape spatial variations in gully development. Gully dynamics between 2000 and 2025 reveal a substantial expansion across all sites, with the total gully area increasing by over 500% in the Ogun-Oshun Basin and the Abuja Plateau. Among the soil variables assessed, sand content, clay content, and the sand-clay ratio emerged as dominant predictors of gully occurrence, accounting for the highest feature importance values (0.15–0.27). Soil organic carbon (SOC) also contributed moderately to model performance, suggesting its stabilising influence on soil structure. The RF models achieved strong predictive accuracy ( $F1\text{-score} = 0.88$ ;  $AUC = 0.79$ ), confirming the robustness of soil-texture-based prediction across heterogeneous landscapes. Spatial variability and uncertainty analyses further indicated that textural heterogeneity largely governs susceptibility patterns rather than model bias. Overall, the findings demonstrate that coarser-textured, low soil organic carbon (SOC) soils are more prone to gully initiation, highlighting the need for targeted soil conservation and vegetation management in erosion-prone basins. The study reinforces the central role of soil composition in shaping gully evolution and provides a data-driven framework for mitigating regional erosion risk.

**Keywords:** Gully erosion; soil properties; SoilGrids; Nigeria; remote sensing; soil erodibility; GIS

## 1. Введение

Овражная эрозия повсеместно признаётся одной из наиболее серьёзных форм деградации земель в мировом масштабе. Она приводит к образованию глубоких промоин, фрагментирующих ландшафты, и удалению плодородного слоя почвы и создаёт угрозу жизнедеятельности населения. Помимо локальных последствий, овраги вносят существенный — и притом непропорционально большой — вклад в увеличение стока наносов, ухудшение качества воды и деградацию экосистем [1, 2]. Актуальность проблемы за последние два десятилетия привлекла внимание исследователей во всём мире. При этом факторы, обусловливающие развитие оврагов, остаются крайне изменчивыми и специфичными для каждого конкретного участка. Их формирование определяется сложным взаимодействием климатических, геоморфологических, почвенных факторов и особенностей землепользования [3, 4].

В Африке овражная эрозия представляет собой значительную экологическую и социально-экономическую угрозу. Современные оценки континентального масштаба, выполненные с применением дистанционного зондирования и методов машинного обучения, показали, что на африканском континенте распространены обширные овражные сети. Особенно это характерно для влажных и субгумидных регионов, где интенсивные осадки сочетаются с неустойчивыми почвами и интенсивным землепользованием [5, 6]. В южной части Африки исследования предрасположенности к оврагообразованию свидетельствуют о том, что, хотя экстремальные осадки инициируют зарождение оврагов, их дальнейшее распространение в значительной степени определяется внутренними свойствами почв и особенностями рельефа [7]. Аналогично, исследования в Западной Африке показывают, что вырубка лесов, слабая структура почв и строительство дорог ускоряют образование оврагов. Это имеет серьёзные последствия для продуктивности сельского хозяйства и инфраструктуры сельских территорий [8].

Нигерия входит в число стран, испытывающих наиболее острые последствия данного процесса. Многочисленные исследования фиксируют тревожные темпы роста оврагов в юго-восточных и южно-центральных штатах, где стремительная урбанизация и обезлесение усугубляют проблему [9–11]. Многовременное картографирование оврагов выявило темпы их расширения от нескольких до десятков метров в год. Это нередко приводит к: потере сельскохозяйственных угодий, разрушению жилых домов и дорог, вынужденному переселению целых населённых пунктов [12, 13]. При этом, несмотря на десятилетия исследований, сосредоточенных преимущественно на роли осадков, сохраняется заметная вариабельность в развитии оврагов при сходных климатических усло-

виях. Последние исследования, проведённые в Нигерии, показывают: почвы с высоким содержанием пыли, низким содержанием органического вещества и слабой агрегатной устойчивостью значительно более подвержены быстрому развитию оврагов по сравнению с соседними участками, где почвы обладают большей связностью [14–16]. Эти данные свидетельствуют о том, что почвенные характеристики — недостаточно изученный, но критически важный фактор, определяющий динамику оврагообразования.

Однако количественная оценка взаимосвязи между свойствами почв и развитием оврагов зачастую затруднена из-за сложности и высокой стоимости сбора полевых данных на множестве участков. В этой связи цифровые методы картографирования почв предлагают альтернативное решение. Они позволяют получать согласованные оценки таких характеристик, как гранулометрический состав, содержание органического углерода и объемная плотность, на обширных территориях [17, 18].

В рамках данного исследования данные о свойствах почв были извлечены из глобальной базы данных Soil-Grids v2.0 (ISRIC), доступ к которой осуществлялся через платформу Google Earth Engine (GEE). Эта база предоставляет стандартизированную почвенную информацию, полученную на основе моделей машинного обучения и гармонизированных почвенных наблюдений. Такие наборы данных позволяют исследовать связи между свойствами почв и эрозионными процессами в ландшафтных и региональных масштабах, в том числе в тех случаях, когда проведение традиционных полевых исследований невозможно.

Таким образом, цель данного исследования — оценить роль свойств почв в развитии овражной эрозии на трёх участках, находящихся в зоне однородного режима осадков. В рамках исследования предполагается: (1) картографировать и количественно оценить динамику овражной эрозии за период с 2000 по 2025 год; (2) извлечь и охарактеризовать свойства почв; (3) установить связь между почвенными переменными и показателями оврагообразования; (4) оценить вариабельность и неопределённость взаимосвязей «почва — овраг»; (5) интерпретировать общую роль почв в объяснении предрасположенности к оврагообразованию при однородном режиме осадков.

## 1. Introduction

Gully erosion is widely recognised as one of the most severe forms of land degradation worldwide, producing deep incisions that fragment landscapes, remove fertile topsoil, and threaten human livelihoods. Beyond local impacts, gullies also contribute disproportionately to sediment fluxes, water quality deterioration, and ecosystem decline [1,2]. The urgency of this problem has drawn global research attention over the past two decades,

yet its drivers remain highly variable and site-specific, reflecting the interaction of climatic, geomorphic, soil, and land-use factors [3,4].

Across Africa, gully erosion represents a significant environmental and socio-economic hazard. Recent continental-scale assessments using remote sensing and machine learning have revealed that Africa is home to extensive gully networks, particularly in humid and sub-humid regions, where high-intensity rainfall combines with fragile soils and intensive land use [5,6]. In southern Africa, susceptibility studies highlight that while extreme rainfall initiates gullying, intrinsic soil and terrain conditions largely govern where gullies expand [7]. Similarly, West African studies demonstrate that land clearing, weak soil structure, and road development accelerate gully initiation, with severe consequences for agricultural productivity and rural infrastructure [8].

Nigeria is among the countries most critically affected. Numerous studies document the alarming growth of gullies in southeastern and south-central states, where rapid urbanisation and deforestation exacerbate the problem [9-11]. Multi-temporal mapping of gullies has revealed expansion rates ranging from a few meters to tens of meters annually, often leading to the loss of farmland, destruction of houses and roads, and displacement of entire communities [12,13]. Yet despite decades of rainfall-focused explanations, notable variability persists among gullies that receive similar climatic inputs. Recent Nigerian studies indicate that soils with high silt content, low organic matter, and poor aggregate stability are far more susceptible to rapid gully advance than adjacent landscapes with more cohesive soils [14-16]. This evidence suggests that soils are an underexplored yet critical factor in shaping gully dynamics.

However, quantifying soil-gully relationships has often been constrained by the difficulty and cost of collecting field soil data across multiple locations. Digital soil mapping initiatives now offer an alternative, providing consistent estimates of soil properties such as texture fractions, organic carbon, and bulk density across large areas [17,18]. In this study, soil property data were extracted from the global SoilGrids v2.0 database (ISRIC), which delivers standardised soil information derived from machine learning models and harmonised soil observations. These datasets enable the testing of soil-erosion linkages at landscape and regional scales, particularly where traditional field campaigns are not feasible.

The aim of this study is therefore to evaluate the role of soil properties in driving gully erosion across three sites under a uniform rainfall regime. Specifically, the study will (i) map and quantify gully erosion dynamics between 2000 and 2025, (ii) extract and characterise soil properties, (iii) relate these soil variables to gully metrics, (iv) assess variability and uncertainty in the soil-gully relationships,

and (v) interpret the broader role of soils in explaining susceptibility under uniform rainfall.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Район исследований

Исследование проводилось в трех ландшафтах Нигерии: плато Абуджа, холмы Иданре и бассейн рек Огун-Ошун (Рис. 1-3). Эти участки были выбраны потому, что представляют геоморфологически разнородные среды, но имеют общий режим осадков, что предоставляет возможность оценить роль свойств почвы в развитии овражной эрозии без мешающего влияния климатической изменчивости. Вместе они также подчеркивают экологическую и социально-экономическую важность борьбы с эрозией, поскольку каждый участок сталкивается с проблемами деградации земель, угрожающими сельскому хозяйству, поселениям и инфраструктуре.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Study Area

The research was carried out in three landscapes in Nigeria: the Abuja Plateau, the Idanre Hills, and the Ogun-Osun River Basin (Fig. 1-3). These sites were selected because they represent geomorphologically diverse environments but share a common rainfall regime, thereby providing an opportunity to evaluate the role of soil properties in driving gully erosion without the confounding influence of climatic variability. Together, they also emphasise the environmental and socio-economic importance of erosion control, as each site faces challenges related to land degradation that threaten agriculture, settlements, and infrastructure.

#### 2.1.1. Плато Абуджа

Плато Абуджа расположено в центральной части Нигерии (Рис. 1), приблизительно между 8°50' с.ш. и 9°30' с.ш., и 7°00' в.д. и 7°40' в.д. Территория характеризуется возвышенным рельефом с островными горами (инзельбергами), расчлененными равнинами и волнистыми холмами, подстилаемыми в основном гранитными и мигматитовыми гнейсами [19]. Выветривание этих пород приводит к образованию песчаных почв, сильно подверженных эрозии при нарушении растительного покрова. Климат влажный тропический, с одним выраженным сезоном дождей с апреля по октябрь и сухим сезоном с ноября по март. Годовое количество осадков в среднем составляет 1200-1500 мм, обычно они выпадают в виде коротких, интенсивных ливней [20]. Быстрая урбанизация на территории Федеральной столичной области ускорила деградацию земель, сделав плато горячей точкой для развития оврагов [21].

Согласно классификации Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB), преобладаю-

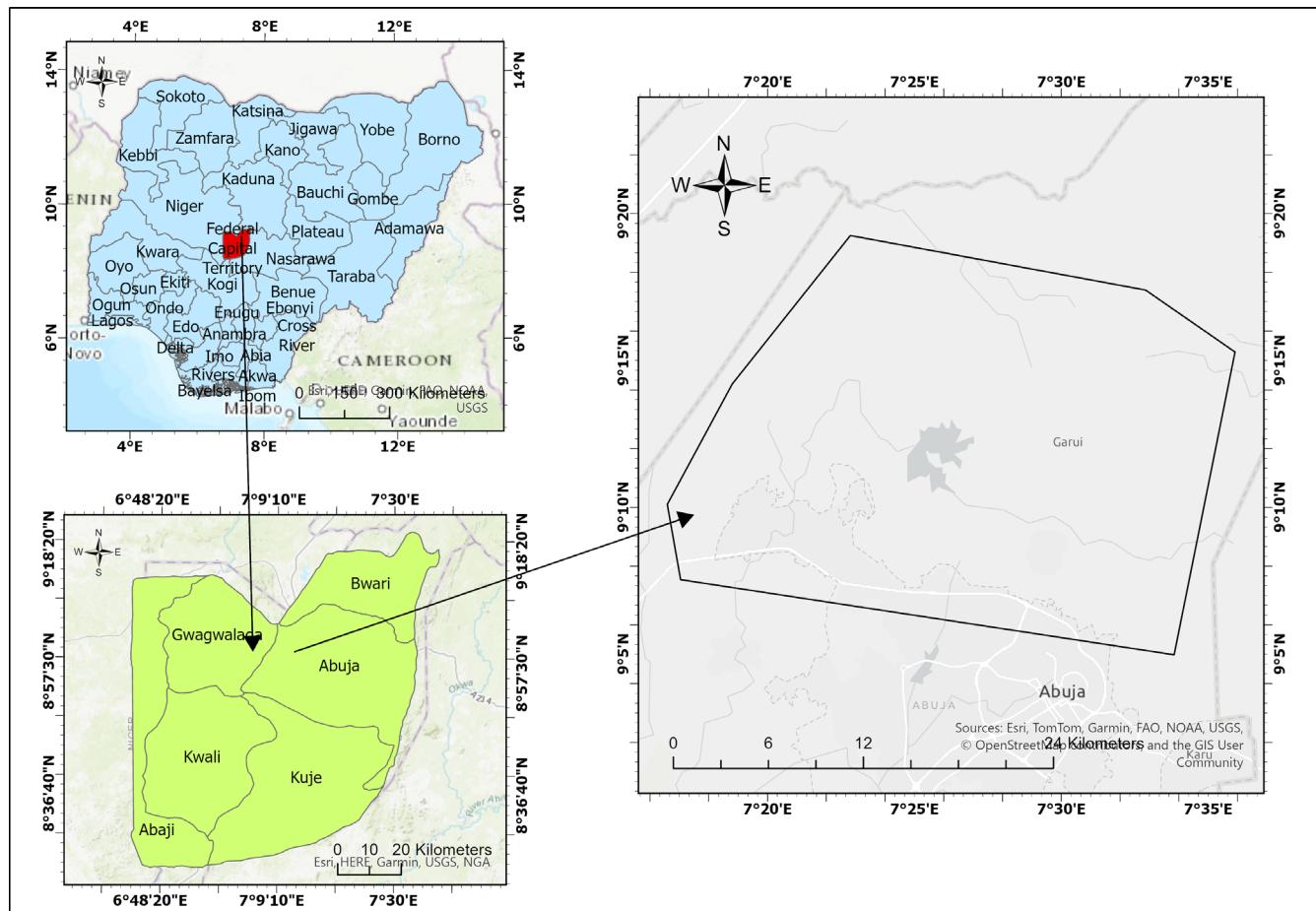
ший почвенный покров плато Абуджа представлен лептосолями, регосолями и ферральсолями, которые сочетаются с акрисолями на нижних частях предгорий и склонах речных долин. Лептосоли и регосоли приурочены к мелководным каменистым возвышеностям и скалистым инзельбергам, где почвообразование ограничено устойчивыми коренными породами фундамента. Ферральсоли и акрисоли, напротив, представляют собой глубоко выветрелые латеритные почвы, распространённые на полого-волнистых поверхностях плато. Эти сильно окисленные, обогащённые железом почвенные профили характеризуются низкой катионаобменной способностью и слабой структурной устойчивостью. Вследствие этого они подвержены интенсивной эрозии при удалении защитного растительного покрова.

### 2.1.1 Abuja Plateau

The Abuja Plateau is situated in north-central Nigeria (Fig. 1), approximately between 8°50'N and 9°30'N, and 7°00'E and 7°40'E. The area is characterised by elevated terrain with inselbergs, dissected plains, and undulating hills,

underlain primarily by granitic and migmatite gneiss rocks [19]. Weathering of these rocks produces sandy soils that are highly erodible when vegetation is disturbed. The climate is humid tropical, with a unimodal rainy season from April to October and a dry season from November to March. Annual rainfall averages 1,200-1,500 mm, typically delivered by short, intense storms [20]. Rapid urban expansion in the Federal Capital Territory has accelerated land degradation, making the plateau a hotspot for gully development [21].

According to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification, the dominant soils of the Abuja Plateau comprise Leptosols, Regosols, and Ferralsols, occurring in association with Acrisols on the lower pediments and valley flanks. The Leptosols and Regosols occupy shallow, stony uplands and rocky inselbergs where resistant basement rocks limit soil formation, while the Ferralsols and Acrisols are deeply weathered, lateritic soils found on the gently undulating plateau surfaces. These highly oxidised, iron-rich profiles exhibit low cation-exchange capacity and weak structural stability, predisposing them to severe erosion once the protective vegetation cover is removed.



**Рис. 1. Карта расположения плато Абуджа.**

**Fig. 1. Location map of the Abuja Plateau.**

### 2.1.2. Холмы Иданре (штат Ондо)

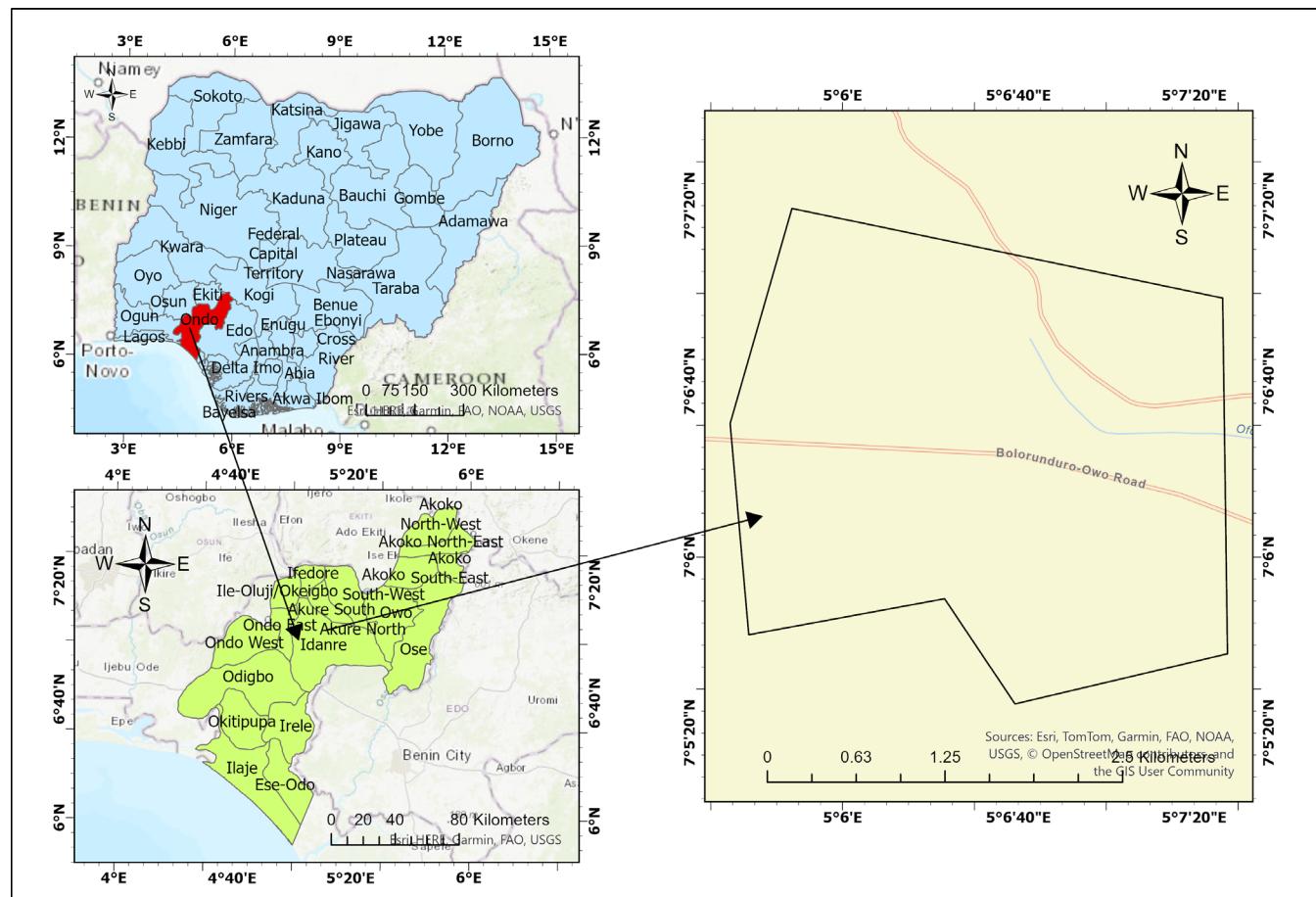
Холмы Иданре расположены на юго-западе Нигерии (Рис. 2), в штате Ондо, в пределах широт от 6°40' с.ш. до 7°10' с.ш. и долгот от 5°00' в.д. до 5°15' в.д. Этот пересеченный ландшафт состоит из крутых гранитных инзельбергов и гряд с высотами, превышающими 900 м [22]. Маломощные почвы и крутые уклоны способствуют быстрому поверхностному стоку во время дождей, а растительность представлена в основном низменным тропическим лесом. Однако расширение сельского хозяйства и заселение территории вокруг города Иданре привели к сведению лесов и обнажению почв. На территории выпадает 1500–2000 мм осадков в год с пиками в июне-июле и в сентябре [23]. Овраги в этом районе, как правило, меньше по размерам, но с крутыми склонами [24], что отражает влияние склоновой гидрологии.

Согласно классификации Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB), почвенный покров холмов Иданре преимущественно представлен лептосолями и регосолями. Эти почвы приурочены к крутым скалистым склонам и вершинам холмов, где мощ-

ность почвенного профиля минимальна, а материнская порода (гранит) выходит на поверхность. На нижних частях предгорий и подножиях долинных склонов широко распространены камбисоли и акрисоли. Они формируют слаборазвитые и средневыветрелые профили, сформировавшиеся в условиях влажного тропического климата. В окружающих низменностях и межхолмовых понижениях встречаются более глубокие, хорошо структурированные ферральсоли и нитисоли. Для них характерны: прочная агрегатная структура, красноватая окраска и низкая насыщенность основаниями — признаки, типичные для интенсивно выветрелых тропических почв. Такое пространственное варьирование почвенного покрова отражает тесное взаимодействие топографии, литологии и степени выветривания в пределах ландшафта Иданре.

### 2.1.2 Idanre Hills (Ondo State)

The Idanre Hills are located in southwestern Nigeria (Fig. 2), within Ondo State, bounded by latitudes 6°40'N to 7°10'N and longitudes 5°00'E to 5°15'E. This rugged landscape comprises steep granitic inselbergs and ridges,



**Рис. 2.** Карта расположения холмов Иданре.  
**Fig. 2.** Location map of the Idanre Hills

with elevations exceeding 900 m [22]. Shallow soils and steep gradients promote rapid surface runoff during rainfall events, while vegetation is derived mainly from lowland rainforest. However, agricultural expansion and settlement activities around Idanre town have led to deforestation and soil exposure. The area receives 1,500–2,000 mm of annual rainfall, with peaks in June and July, and again in September [23]. Gullies in this area are typically smaller but steep-sided [24], reflecting the influence of slope-driven hydrology.

According to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification, the soils of the Idanre Hills are predominantly Leptosols and Regosols, occurring on the steep, rocky hill slopes and summits where soil depth is minimal and the parent material is exposed granite. On the lower pediments and valley footslopes, Cambisols and Acrisols are common, representing weakly developed to moderately weathered profiles formed under humid tropical conditions. Surrounding lowlands and inter-hill depressions host deeper, well-structured Ferralsols and Nitisols, characterised by strong aggregation, reddish colouration, and low base saturation typical of intensely weathered tropical soils. This spatial variation reflects the close interaction between topography, lithology, and degree of weathering across the Idanre landscape.

### 2.1.3 Бассейн рек Огун-Ошун

Бассейн Огун-Ошун охватывает части штатов Огун, Осун и Ойо (Рис. 3), занимая площадь около 75 000 км<sup>2</sup> между 6°30' и 8°45' с. ш. и 3°00' и -5°30' в. д.. Это крупная речная система, впадающая в Лагосскую лагуну через реки Огун и Ошун [25]. Геология меняется от пород фундаментного комплекса на севере к осадочным формациям на юге, что приводит к почвам от ферраллитных тропических до песчаных аллювиальных [26]. Количество осадков варьирует от 1200 мм на севере до почти 2000 мм на юге [27]. Тем не менее, бассейн находится в той же влажной тропической зоне, что и другие участки. Землепользование доминирует сельскохозяйственное, хотя урбанизация вокруг Ибадана, Абеокуты и Ошогбо усилила эрозию [28], при этом овраги часто наблюдаются вдоль дорожной сети и окраин поселений.

Согласно классификации Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB), в бассейне реки Огун-Осун на возвышенностях и склонах средней крутизны наблюдается мозаичное распространение ферральсолей, нитисолей, акрисолов и ликсисолов. Эти почвы сформировались на глубоко выветрелых железистых материнских породах. Для указанных почв типичны красноватая или желтовато-красная окраска, хорошая водопроницаемость и низкие запасы питательных веществ, что является следствием длительного тропического выветривания. В южной части бассейна и на аллювиальных участках преобладают

флювисоли и глейсоли. Они приурочены к современным аллювиальным отложениям и гидроморфным ландшафтам в поймах и речных долинах. Локально, в пределах осадочных зон, также встречаются слаборазвитые песчаные ареносоли и регосоли. Такое сочетание сильно выветрелых почв возвышенностей и гидроморфных почв низменностей обуславливает неоднородность эрозионных процессов в бассейне и определяет различия в пригодности земель для хозяйственного использования в пределах его физико-географических зон.

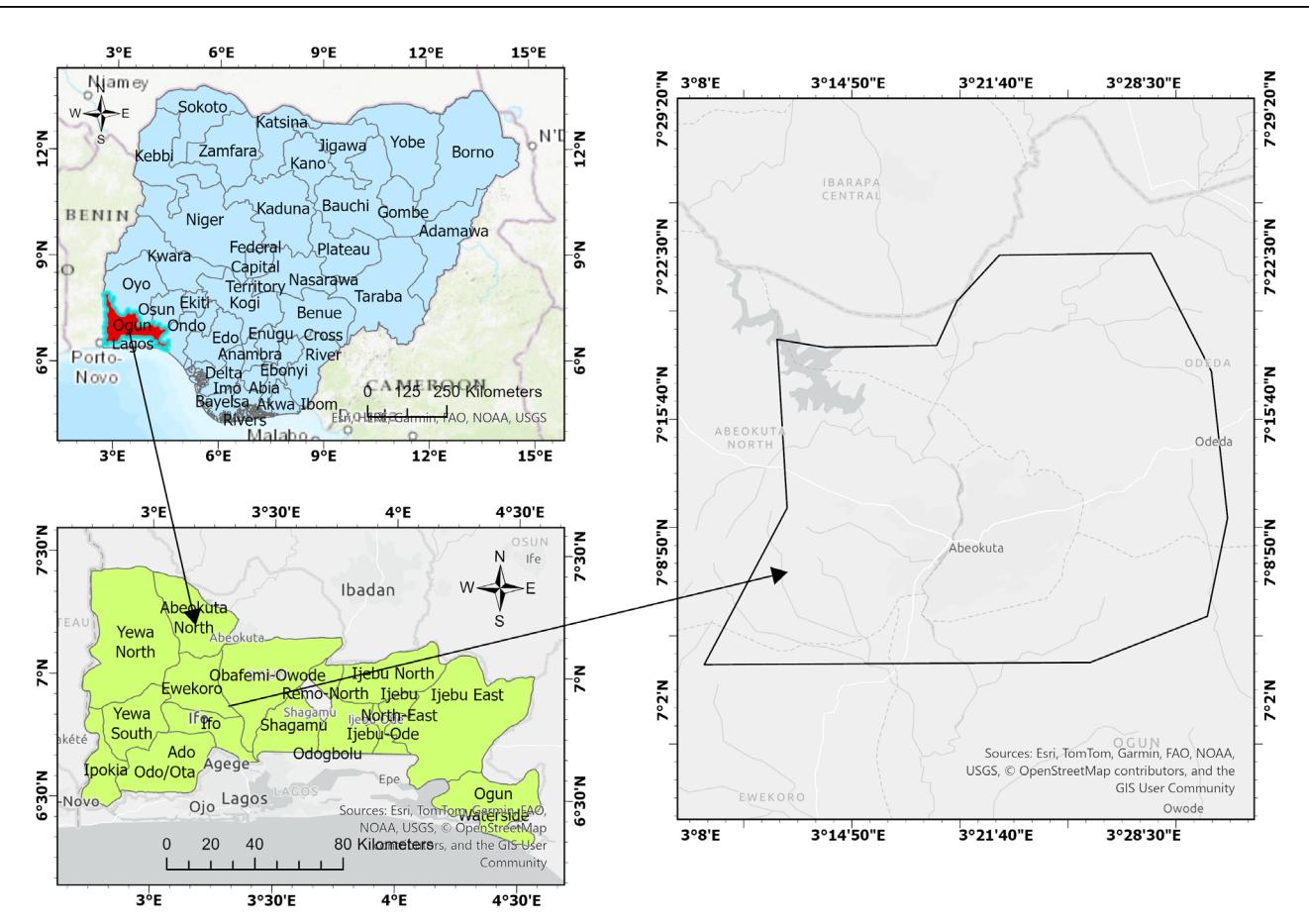
#### 2.1.3. Ogun-Osun River Basin

The Ogun-Osun Basin spans parts of Ogun, Osun, and Oyo States (Fig. 3), covering an estimated 75,000 km<sup>2</sup> between 6°30'N-8°45'N and 3°00'E-5°30'E. It is a major fluvial system draining into the Lagos Lagoon via the Ogun and Osun Rivers [25]. The geology transitions from basement complex rocks in the north to sedimentary formations in the south, resulting in soils that range from ferruginous tropical soils to sandy alluvium [26]. Rainfall varies from 1,200 mm in the north to nearly 2,000 mm in the south [27]. However, the basin falls within the same humid tropical zone as the other sites. Land use is primarily dominated by agriculture, although urbanisation around Ibadan, Abeokuta, and Oshogbo has intensified erosion [28], with gullies commonly observed along road networks and settlement fringes.

According to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification, the Ogun-Osun River Basin exhibits a mosaic of Ferralsols, Nitisols, Acrisols, and Lixisols across the upland and mid-slope landscapes, underlain by deeply weathered, ferruginous parent materials. These soils are typically red to yellowish-red, well-drained, and low in nutrient reserves, reflecting the prolonged tropical weathering that has occurred over time. In the southern and alluvial portions of the basin, Fluvisols and Gleysols are dominant, corresponding to recent alluvial deposits and hydromorphic environments along the floodplains and river valleys. Sandy and weakly developed Arenosols and Regosols also occur locally within the sedimentary zones. This combination of highly weathered upland soils and hydromorphic lowland soils shapes the basin's variable erosion dynamics and influences land-use suitability across its physiographic zones.

## 2.2. Дизайн исследования

Для изучения того, как свойства почвы влияют на овражную эрозию в условиях однородного режима осадков, был использован сравнительный многосекционный геопространственный дизайн исследования. Вниманием, сосредоточенным на трех локациях в одной климатической зоне было обеспечено отсутствие влияния осадков как мешающего фактора, что позволило исследовать свойства почв в качестве ключевого



**Рис. 3: Карта расположения бассейна рек Огун-Ошун.**  
**Fig. 3 Location map of the Ogun-Osun River Basin.**

детерминанта вариаций в динамике оврагов. Принятый подход объединял дистанционное зондирование, ГИС и статистический анализ, что позволило охватить как временные изменения, так и пространственные закономерности в развитии оврагов и их взаимосвязь с почвенными характеристиками.

## 2.2. Research Design

A comparative, multi-site geospatial research design was employed to examine how soil properties influence gully erosion under uniform rainfall conditions. By focusing on three locations within the same climatic zone, it was ensured that rainfall would not be a confounding factor, allowing soils to be investigated as the key determinant of variation in gully dynamics. The adopted approach combined remote sensing, GIS, and statistical analysis within a single framework, enabling the capture of both temporal changes and spatial patterns in gully development, as well as their relationship with soil characteristics.

## 2.3. Источники данных

Были использованы множественные наборы данных, представляющие взаимодополняющие сведения о динамике оврагов, свойствах почв и пространственных границах. Ключевые наборы данных, использованные в этом исследовании, суммированы в Таблице 1.

## 2.3 Data Sources

Multiple datasets were utilised that provided complementary information on gully dynamics, soil properties, and spatial reference boundaries. The key datasets used in this study are summarised in Table 1.

## 2.4. Предварительная обработка данных

Для подготовки наборов данных к анализу был выполнен ряд шагов предобработки для обеспечения пространственной согласованности и сопоставимости по трем исследуемым участкам. Эти шаги суммированы в Таблице 2. Благодаря этим шагам было обеспечено, что все наборы данных пространственно совмещены, имеют единое разрешение и адаптированы к району исследований. Полученные почвенные индексы и параметры оврагов легли в основу последующего статистического анализа взаимосвязей между почвой и оврагами.

Табл. 1. Table 1.

**Сводка по наборам данных, использованным в исследовании.**  
*Summary of datasets used in the study*

Тип данных <i>Data type</i>	Источник / платформа <i>Source / Platform</i>	Переменные / описание <i>Variables / Description</i>	Временной охват <i>Temporal coverage</i>	Пространственное разрешение / Глубина <i>Spatial resolution / Depth</i>	Назначение в исследовании <i>Purpose in the study</i>
Об оврагах <i>Gully data</i>	Google Earth Pro	Оцифрованные контуры оврагов <i>Digitised gully polygons</i>	2000–2025	Съёмка высокого разрешения <i>High-resolution imaging</i>	Картографирование и количественная оценка динамики овражной эрозии <i>Mapping and quantifying gully dynamics</i>
О почвах <i>Soil data</i>	SoilGrids v. 2.0 (ISRIC)	Песок, ил, глина, органический углерод почвы (SOC), объёмная масса <i>Sand, silt, clay, soil organic carbon (SOC), and bulk density</i>	Статичные данные <i>Static</i>	0–30 см <i>0–30cm</i>	Характеристика свойств почв <i>Characterisation of soil properties</i>
Вспомогательные <i>Supporting data</i>	Административные границы <i>Administrative boundaries</i>	Национальные/государственные векторные слои <i>National/state vector layers</i>	Статичные данные <i>Static</i>	Векторные данные (масштаб 1:50 000) <i>Vector (scale 1:50,000)</i>	Определение границ исследуемой территории и картографический контекст <i>Defining study area boundaries and mapping context</i>

#### 2.4 Data Preprocessing

To prepare the datasets for analysis, a series of preprocessing steps was carried out to ensure spatial consistency and comparability across the three study sites. These steps are summarised in Table 2. Through these steps, it was ensured that all datasets were spatially aligned, at a uniform resolution, and tailored to the study area. The derived soil indices and gully metrics provided the basis for subsequent statistical analysis of the relationships between soil and gully.

#### 2.5. Сопряжение данных о почвах и оврагах

Интеграция почвенных данных и сведений об оврагах выполнялась в среде Google Earth Engine (GEE). Это позволило обеспечить точное пространственное согласование данных и эффективно извлечь характеристики почв. В GEE были загружены оцифрованные полигоны оврагов (полученные в Google Earth Pro) для трёх исследуемых участков — плато Абуджа, бассейна Огун-Ошун и холмов Иданре, набор данных SoilGrids v2.0 (глубина 0–30 см). Из почвенных данных были извлечены следующие показатели: объемная плотность почвы, катионообменная способность (СЕС), содержание глины, содержание песка, соотношение песок/глина, содержание почвенного органического углерода (SOC).

Для каждого полигона оврага была создана буферная зона шириной 50 м. Это позволило охватить прилегающую почвенную зону, оказывающую влияние на зарождение и развитие оврагов. В пределах каждой буферной зоны в GEE рассчитаны зональные статистики — средние значения почвенных показателей. Затем данные экспортаны в виде CSV-файлов, отдельных для каждого исследуемого участка [14, 29]. Полученные табличные наборы данных послужили основой для последующего моделирования. Такой подход обеспечил: пространственное согласование установленных связей между свойствами почв и развитием оврагов и эффективную обработку данных SoilGrids высокого разрешения за счёт облачных вычислительных возможностей GEE [30, 31].

Данные о свойствах почв были получены из глобальной растровой базы данных SoilGrids v2.0 [17], которая предоставляет непрерывные карты ключевых почвенных характеристик с пространственным разрешением 250 м для шести стандартных интервалов глубины: 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 и 100–200 см — в соответствии со спецификациями GlobalSoilMap [32]. База SoilGrids создана Международным центром почвенной информации и референции (ISRIC) с применением моделей машинного обучения. Эти модели обучены на массиве, включающем свыше 240 000 описаний почвенных профилей, с учётом экологических кова-

**Основные этапы предобработки данных**  
*Summary of data preprocessing steps*

Набор данных Dataset	Этап предобработки <i>Preprocessing step</i>	Цель <i>Purpose</i>	Используемая система координат <i>CRS Used</i>
Все пространственные данные <i>All spatial data</i>	Перепроектирование в зону UTM (соответствующую территории Нигерии) <i>Projected to UTM Zone (appropriate for Nigeria)</i>	Обеспечение единой системы координат для всех данных <i>Ensuring a consistent coordinate system</i>	WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG: 32632)
Слои SoilGrids <i>SoilGrids layers</i>	Передискретизация до разрешения 30 м; обрезка по границам исследуемой территории; расчёты производных индексов (соотношения песок/глина, ил/глина) <i>Resampled to 30 m resolution; clipped to study area; derived indices (sand/clay, silt/clay ratios)</i>	Приведение к единому пространственному разрешению; вычисление показателей эродируемости почв <i>Harmonising resolution and computing soil erodibility indicators</i>	WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG: 32632)
Данные об оврагах <i>Gully data</i>	Оцифровка полигонов в Google Earth Pro; расчёты метрик в ArcGIS Pro (площадь, длина, годовые темпы роста) <i>Digitised polygons from Google Earth Pro; converted to metrics (area, length, annual growth rates) in ArcGIS Pro</i>	Формирование показателей овражной эрозии для временного анализа <i>Generate gully erosion indicators for temporal analysis</i>	WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG: 32632)

риатов – данных о климате, рельефе и материалах дистанционного зондирования. Для описания состояния поверхности слоя почв, значимого при моделировании эрозии и деградации земель, почвенные параметры были агрегированы в композитный слой 0–30 см. Агрегация выполнена путём расчёта средневзвешенного по глубине значения для первых трёх слоёв SoilGrids (0–5, 5–15 и 15–30 см) по формуле:

$$X_{0-30} = \frac{5X_{0-5} + 10X_{5-15} + 15X_{15-30}}{30}$$

где:  $X_{0-30}$  – значение показателя (содержание песка, пыли, глины или органического углерода) для слоя 0–30 см.

Данный подход соответствует рекомендациям GlobalSoilMap по агрегации данных и гарантирует, что полученный слой адекватно отражает взвешенный вклад каждого интервала глубины в пределах верхнего почвенного горизонта.

## 2.5. Linking Soil and Gully Data

The integration of soil and gully data was performed in the Google Earth Engine (GEE) environment to ensure consistent spatial alignment and efficient extraction of soil attributes. Digitised gully polygons (from Google Earth Pro) for the three study sites — Abuja Plateau, Ogun-Oshun Basin, and Idanre Hills — were uploaded to GEE alongside the SoilGrids v2.0 dataset (0–30 cm

depth). The relevant soil variables extracted included bulk density, cation exchange capacity (CEC), clay content, sand content, sand-to-clay ratio, and soil organic carbon (SOC).

A 50 m buffer was applied around each gully polygon to capture the immediate soil zone influencing gully initiation and expansion. Within each buffered area, zonal statistics were computed in GEE to extract mean soil values, which were subsequently exported as site-specific CSV files (one per study area) [29, 14]. These tabular datasets formed the analytical foundation for subsequent modelling. This approach ensured that soil-gully linkages were derived in a spatially consistent manner, while leveraging GEE's cloud-based processing capabilities to handle high-resolution SoilGrids data efficiently [30,31].

Soil property data were obtained from the SoilGrids v2.0 global gridded database [17], which provides continuous maps of key soil attributes at 250 m spatial resolution for six standard depth intervals (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100, and 100–200 cm) following the GlobalSoilMap specifications [32]. SoilGrids is produced by the International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) using machine-learning models trained on over 240,000 soil profile observations combined with environmental covariates such as climate, terrain, and remote sensing data.

To represent surface soil conditions relevant for erosion and land degradation modelling, soil parameters were ag-

gregated to a 0–30 cm composite layer by computing a depth-weighted average of the first three SoilGrids layers (0–5, 5–15, and 15–30 cm) using the formula:

$$X_{0-30} = \frac{5X_{0-5} + 10X_{5-15} + 15X_{15-30}}{30}$$

where  $X_{0-30}$  represents the property value (sand, silt, clay, or organic carbon) for the 0–30 cm layer.

This approach adheres to the GlobalSoilMap aggregation guideline, ensuring that the derived layer accurately reflects the weighted contribution of each depth interval within the upper soil horizon.

## 2.6. Анализ данных

CSV-файлы, полученные в Google Earth Engine (GEE), были после извлечения импортированы в Google Colab для статистического анализа и машинного обучения с использованием языка Python и следующих библиотек: *pandas*, *scikit-learn*, *NumPy* и *Matplotlib*. Для каждого исследуемого участка отдельно применялся алгоритм классификации «случайный лес» (*Random Forest*, RF). Целью было смоделировать наличие (1) или отсутствие (0) оврагов как функцию шести почвенных переменных, извлечённых из базы SoilGrids. Оценка качества модели выполнялась методом пятикратной перекрёстной проверки (*five-fold cross-validation*). Эффективность модели оценивалась по следующим метрикам: точность (*accuracy*), прецизионность (*precision*), полнота (*recall*), F1-мера (*F1-score*), площадь под кривой ошибок приёмника (*area under the receiver operating characteristic curve*, AUC).

Из каждой обученной модели были извлечены показатели важности переменных. Это позволило количественно оценить относительный вклад отдельных почвенных параметров в предрасположенность к оврагообразованию. Кроме того были выполнены: описательная статистика и сравнительный анализ по участкам для оценки вариабельности и неопределенности взаимосвязей «почва–овраг» [14, 17]. Алгоритм RF был выбран по следующим причинам: устойчивость к мультиколлинеарности, способность выявлять нелинейные зависимости между свойствами почв и эрозией, доказанная эффективность при картографировании экологической предрасположенности [33, 18]. Совместная работа в средах GEE и Colab позволила создать воспроизводимую и масштабируемую методологическую схему. Она обеспечивает установление связей между свойствами почв и возникновением оврагов в условиях однородного режима осадков. Наконец, были проведены межплощадочные сравнения взаимосвязей «овраг–почва». Это позволило: выявить различия между тремя исследуемыми участками и их общие черты и оценить, как почвенные характеристики обуславливают динамику овражной эрозии при однородном режиме осадков.

## 2.6. Data Analysis

After extraction, the CSV files from GEE were imported into Google Colab for statistical and machine learning analysis using Python (*pandas*, *scikit-learn*, *NumPy*, and *Matplotlib* libraries). The Random Forest (RF) classification algorithm was applied separately for each site to model the presence (1) and absence (0) of gullies as a function of the six SoilGrids-derived soil variables. Model evaluation was conducted using a five-fold cross-validation approach, with performance assessed through accuracy, precision, recall, F1-score, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUC).

Variable importance scores were extracted from each trained model to quantify the relative contribution of individual soil parameters to gully susceptibility. Descriptive statistics and site-level comparisons were also undertaken to assess variability and uncertainty in soil-gully relationships [14, 17]. The RF approach was selected for its robustness to multicollinearity, capacity to capture nonlinear soil-erosion relationships, and proven suitability for environmental susceptibility mapping [33, 18]. Together, the GEE-Colab workflow provided a reproducible and scalable framework for linking soil properties to gully occurrence under uniform rainfall conditions. Finally, cross-site comparisons of gully-soil relationships were conducted to highlight differences and commonalities across the three study areas, thereby assessing how soils condition gully erosion dynamics under uniform rainfall regimes.

## 3. Результаты

### 3.1. Динамика овражной эрозии в период с 2000 по 2025 год

Для выполнения первой задачи на всех трёх исследуемых участках были картографированы овраги в 2000 и 2025 годы. Затем количественно оценены следующие показатели: число оврагов, общая площадь оврагов, средняя площадь одного оврага, максимальная площадь отдельного оврага. Результаты демонстрируют выраженное увеличение как площади, так и количества оврагов за 25-летний период (табл. 3). Сопоставительный анализ данных из табл. 3 и 4 выявил устойчивую и тревожную тенденцию: на всех трёх участках за период с 2000 по 2025 год выросло число оврагов и увеличилась их суммарная площадь. Наиболее значительные изменения зафиксированы в бассейне Огун-Ошун: число оврагов возросло более чем в два раза (с 58 до 129), общая площадь оврагов увеличилась на 5,36 км<sup>2</sup>, прирост составил свыше 614 %, среднегодовые темпы расширения – 0,21 км<sup>2</sup>/год. На плато Абуджа также отмечен существенный рост оврагообразования: общая площадь увеличилась с 0,83 до 5,19 км<sup>2</sup>, прирост составил 523%, среднегодовые темпы расширения – 0,17 км<sup>2</sup>/год. Холмы Иданре, несмотря на наименьшую общую площадь оврагов (с 0,004 до 0,019 км<sup>2</sup>), проде-

монстрировали значительный прирост в 418%. Это свидетельствует о том, что даже слабо урбанизированные ландшафты не застрахованы от нарастающей активности оврагообразования.

### 3. Results

#### 3.1 Gully Erosion Dynamics between 2000 and 2025

To address the first objective, gullies were mapped for the years 2000 and 2025 across the three study sites, and their number, total area, mean area, and maximum area were quantified. The results reveal a pronounced increase in both the extent and number of gullies over the 25 years (Table 3). The comparative analysis from Tables 3 and 4 shows a consistent and alarming increase in both the number and the areal extent of gullies across all three study areas between 2000 and 2025.

The gully density values further emphasise the intensity of landscape degradation, with the Ogun Osun Basin and Abuja showing the highest densities in 2025, reflecting the influence of urban expansion, vegetation loss, and poor land management practices. The growth factors derived from Table 4 (ranging from 5× in Idanre to over 7× in Ogun Osun Basin) demonstrate how rapidly gully systems have evolved over the past 25 years. The spatial distribution of gullies for both years is visualised in Fig. 4.

Показатели плотности оврагов дополнительно подчёркивают интенсивность деградации ландшафтов. В 2025 году наибольшая плотность зафиксирована: в бассейне Огун-Ошун (0,53%) и на плато Абуджа (0,78%). Такие значения отражают влияние следующих факторов: расширение городских территорий, сокращение растительного покрова, неэффективное землепользование. Коэффициенты роста, рассчитанные на основе данных табл. 4 (от 5 раз для Иданре до более чем 7 раз для бассейна Огун-Ошун), наглядно демонстрируют, насколько стремительно развивались овражные системы за последние 25 лет. Пространственное распределение оврагов за оба временных среза представлено на рис. 4.

The gully density values further emphasise the intensity of landscape degradation, with the Ogun Osun Basin and Abuja showing the highest densities in 2025, reflecting the influence of urban expansion, vegetation loss, and poor land management practices. The growth factors derived from Table 4 (ranging from ×5 in Idanre to over ×7 in Ogun Osun Basin) demonstrate how rapidly gully systems have evolved over the past 25 years. The spatial distribution of gullies for both years is visualised in Fig. 4.

#### 3.2. Обзор характеристик почв на трёх исследуемых участках

На рис. 5 представлены сводные данные о физико-химических свойствах почв на трёх участках ис-

следования: на плато Абуджа, в бассейне Огун-Ошун и на холмах Иданре. Анализировались следующие показатели: объемная плотность почвы, катионообменная способность (СЕС), содержание глинистой и песчаной фракций, соотношение песок/глина, содержание почвенного органического углерода (SOC). Эти параметры отражают физическое и химическое состояние почв, а также их потенциальную связь с процессом оврагообразования.

Можно отметить следующие особенности: почвы бассейна Огун-Ошун характеризуются повышенным содержанием песка и плотностью сложения, почвы холмов Иданре отличаются более тонким гранулометрическим составом и высоким содержанием органического углерода. Пространственная изменчивость почвенных характеристик создаёт важную основу для интерпретации последующих результатов анализа методом «случайного леса» (раздел 3.3). В нём исследуются прогностические связи между указанными почвенными параметрами и наличием оврагов.

#### 3.2. Overview of Soil Characteristics across the three Study Sites

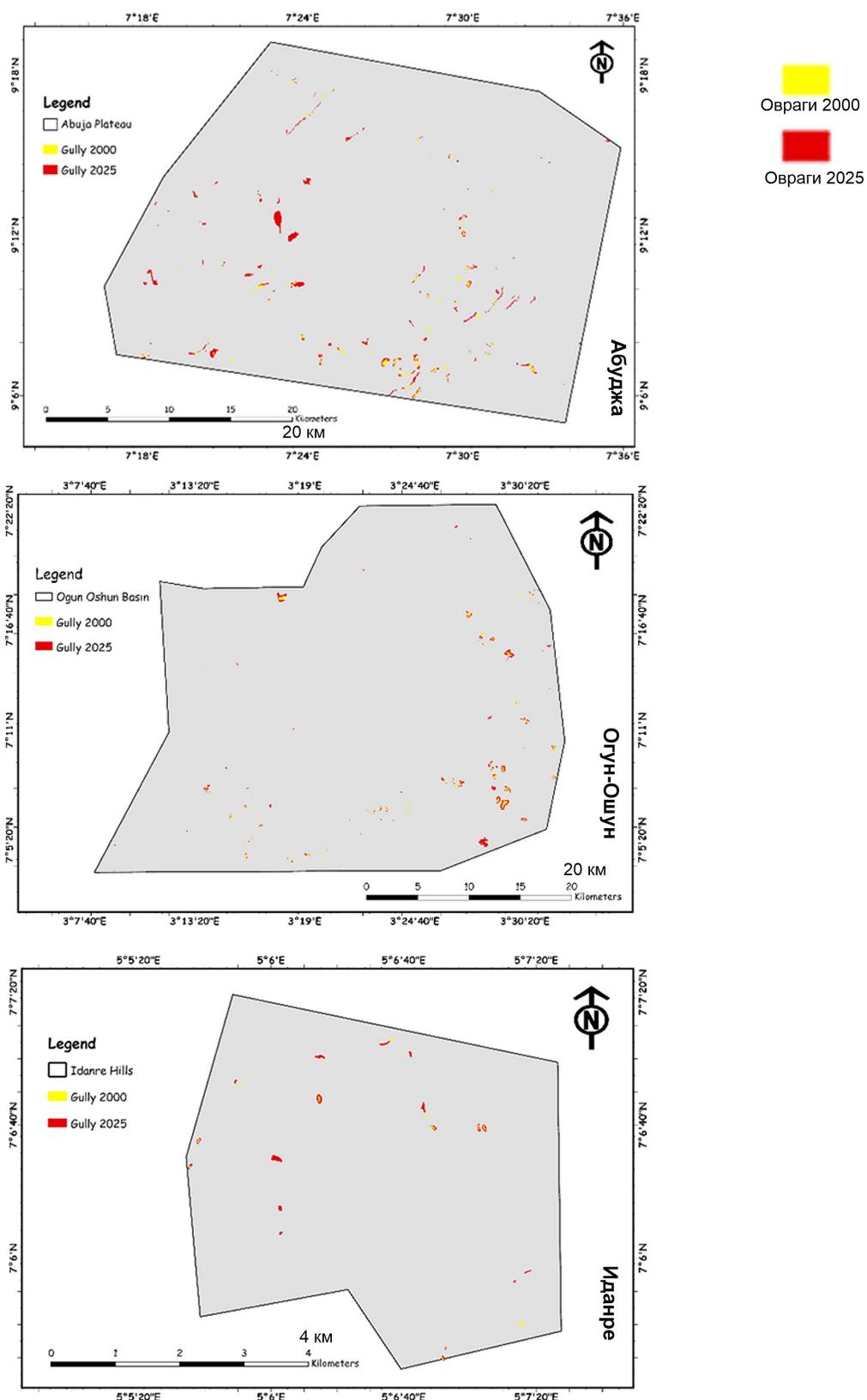
The descriptive summary of soil physicochemical properties across the three study sites, Abuja Plateau, Ogun-Oshun Basin, and Idanre Hills, is presented in Fig. 5. The analysed variables include bulk density, cation exchange capacity (CEC), clay and sand fractions, sand/clay ratio, and soil organic carbon (SOC). These indicators reflect the physical and chemical status of soils and their potential relationship to gully formation.

Soils of the Ogun-Oshun Basin are characterised by higher sand content and bulk density, while those of the Idanre Hills exhibit finer texture and greater organic carbon. These spatial variations in soil characteristics provide a crucial foundation for interpreting the subsequent Random Forest analysis (Section 3.3), which examines the predictive relationships between these soil parameters and the presence of gullies.

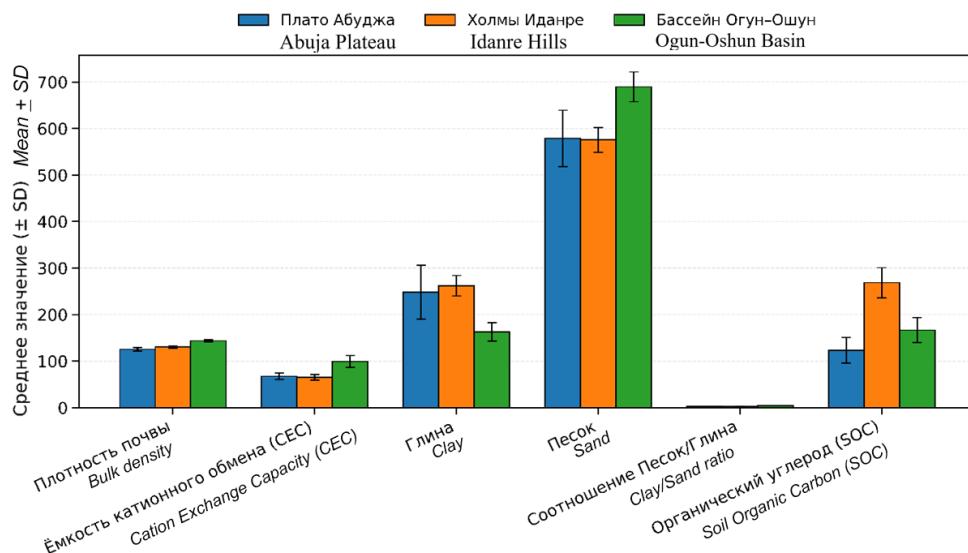
#### 3.3. Классификация методом «случайного леса» наличия оврагов в зависимости от почвенных атрибутов

Для каждого исследуемого участка отдельно были построены модели «случайного леса» (Random Forest, RF) с целью оценить прогностическую силу почвенных переменных при объяснении факта наличия оврагов. Обобщённые показатели важности признаков и статистические характеристики качества моделей представлены на рисунках 6 и 7.

В всех локациях ключевыми предикторами наличия оврагов выступили показатели гранулометрического состава почв — в первую очередь содержание песка, содержание глины и соотношение песок/



**Рис. 4.** Карты оврагов для каждого участка, показывающие оцифрованные овраги 2000 и 2025 годов  
**Fig. 4.** Gully maps for each site showing the Digitised 2000 and 2025 Gullies



**Рис. 5.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая (среднее  $\pm$  стандартное отклонение) свойства почв (0-30 см) на трех участках исследования.

**Fig. 5.** Grouped Bar chart showing the (mean  $\pm$  SD) of soil properties (0-30 cm) across the three study sites.

глина. Совместно эти переменные обеспечили наивысшие значения относительной важности (в диапазоне от 0,15 до 0,27). Это свидетельствует о том, что баланс между крупно- и мелкофракционными компонентами существенно регулирует эродируемость почв. Почвенный органический углерод (SOC) также продемонстрировал значимый вклад на участках плато Абуджа и бассейна Огун-Ошун (0,17–0,20). Это позволяет предположить, что повышенные уровни SOC способны: усиливать агрегатную устойчивость почв, снижать риск зарождения оврагов. В то же время объемная плотность почвы и катионообменная способность (CEC) оказались сравнительно менее значимыми. Это указывает на то, что структурные и химические свойства почв играют скорее опосредованную роль в регулировании процессов оврагообразования.

### 3.3. Random Forest Classification of Gully Presence in relation to Soil Attributes

The Random Forest (RF) models were developed separately for each study site to evaluate the predictive strength of soil variables in explaining gully occurrence. The overall feature importance and model performance statistics are presented in Figs. 6 and 7.

Across all locations, soil texture variables, particularly sand, clay, and the sand/clay ratio, emerged as the dominant predictors of gully presence. These variables jointly accounted for the highest relative importance values (ranging from 0.15 to 0.27), indicating that the balance between coarse and fine fractions strongly regulates soil erodibility. Soil organic carbon (SOC) also contributed meaningfully at the Abuja Plateau and Ogun-Oshun Basin

sites (0.17–0.20), suggesting that higher SOC levels may enhance aggregate stability and reduce the risk of gully initiation. In contrast, bulk density and cation exchange capacity (CEC) were of comparatively lower importance, implying that structural and chemical soil attributes play more indirect roles in controlling gully processes.

Показатели качества модели дополнительно демонстрируют межплощадочную изменчивость. На участках плато Абуджа и бассейна Огун-Ошун достигнуты умеренные и высокие значения прогностической точности (0,65–0,78) и F<sub>i</sub>-меры (0,74–0,81). Это свидетельствует о надёжной дифференцирующей способности модели при разделении участков с оврагами и без них. В отличие от них, модель для холмов Иданре показала ограниченную прогностическую способность. Основной причиной стали малый размер обучающей выборки, низкая вариабельность почвенных предикторов. Относительно высокие значения AUC на всех участках (0,62–0,80) указывают на приемлемую обобщающую способность моделей и устойчивость пороговых значений классификации.

В целом полученные результаты подтверждают, что гранулометрический состав почв и содержание органического вещества – ключевые факторы, определяющие возникновение оврагов при однородном режиме осадков. Результаты моделирования методом «случайного леса» подтверждают гипотезу: почвы с более грубым гранулометрическим составом при низком содержании SOC демонстрируют повышенную предрасположенность к размыву и развитию оврагов. Согласованность результатов по всем участкам позволяет сделать вывод: состав почв играет первостепенную роль в динамике овражной эрозии. Это соответствует

Табл. 3. Table 3

**Сводка по оврагам на уровне участков (2000 год в сравнении с 2025 годом)**  
**Site-level gully summary (2000 vs 2025)**

Участок <i>Site</i>	Год <i>Year</i>	Число оврагов <i>No. of gullies</i>	Общая площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Total area (km<sup>2</sup>)</i>	Средняя площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Mean area (km<sup>2</sup>)</i>	Максимальная площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Max area (km<sup>2</sup>)</i>	Плотность оврагов (% площади участка) <i>Gully density (% of site area)</i>
Абуджа <i>Abuja</i>	2000	64	0,833	0,013	0,058	0,12
	2025	106	5,187	0,0489	0,479	0,78
Огун-Ошун <i>Ogun-Oshun</i>	2000	58	0,872	0,015	0,117	0,07
	2025	129	6,234	0,0483	0,437	0,53
Иданре <i>Idanre</i>	2000	12	0,004	0,0003	0,001	0,04
	2025	18	0,019	0,001	0,003	0,20

Табл. 4. Table 4

**Показатели изменения овражной сети в период с 2000 по 2025 год**  
**Gully change metrics between 2000 and 2025**

Участок <i>Site</i>	Увеличение <i>Increment</i>				Годовые темпы расширения (км <sup>2</sup> /год) <i>Annual expansion (km<sup>2</sup>/ year)</i>	Прирост общей площади оврагов (%) <i>% change in total gully area</i>	Коэффициент роста площади оврагов (×) <i>Gully area growth factor (×)</i>
	Число оврагов <i>No. of gullies</i>	Общая площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Total area (km<sup>2</sup>)</i>	Средняя площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Mean area (km<sup>2</sup>)</i>	Максимальная площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Max area (km<sup>2</sup>)</i>			
Абуджа <i>Abuja</i>	42	4,3541	0,0359	0,4208	0,1742	522,7539	6,2275
Огун-Ошун <i>Ogun-Oshun</i>	71	5,362	0,0333	0,32	0,2145	614,6058	7,1461
Иданре <i>Idanre</i>	6	0,0151	0,0007	0,0027	0,0006	418,3472	5,1835

поставленной цели – установить связь между почвенными характеристиками и пространственными паттернами предрасположенности к оврагообразованию.

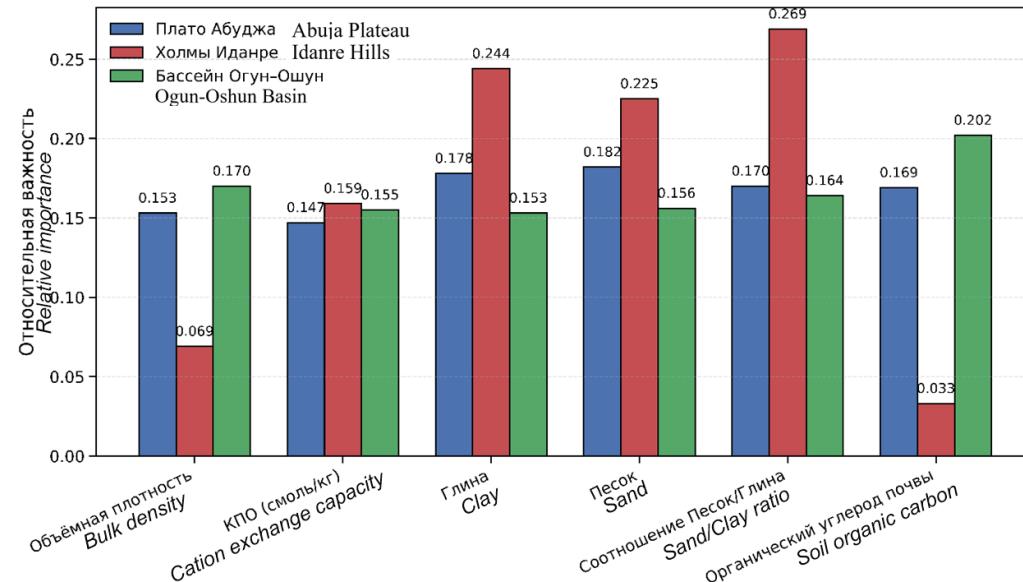
Model performance metrics further highlight site-specific variability. The Abuja Plateau and Ogun-Oshun Basin sites achieved moderate to strong predictive accuracies (0.65–0.78) and F1-scores (0.74–0.81), demonstrating robust discrimination between gully and non-gully conditions. In contrast, the Idanre Hills model yielded limited predictive power, mainly due to a small training sample size and low variability in soil predictors. The relatively higher AUC values across sites (0.62–0.80) indicate acceptable model generalisation and stable classification thresholds.

Overall, these results confirm that soil texture and organic matter properties are key determinants of gully occurrence under a uniform rainfall regime. The RF outcomes support the hypothesis that coarser-textured soils, when combined with low SOC content, exhibit a higher susceptibility to detachment and gully development. This cross-site consistency supports the inference that soil composition exerts a first-order control on gully erosion dynamics, fulfilling the objective of linking soil variables to gully susceptibility patterns.

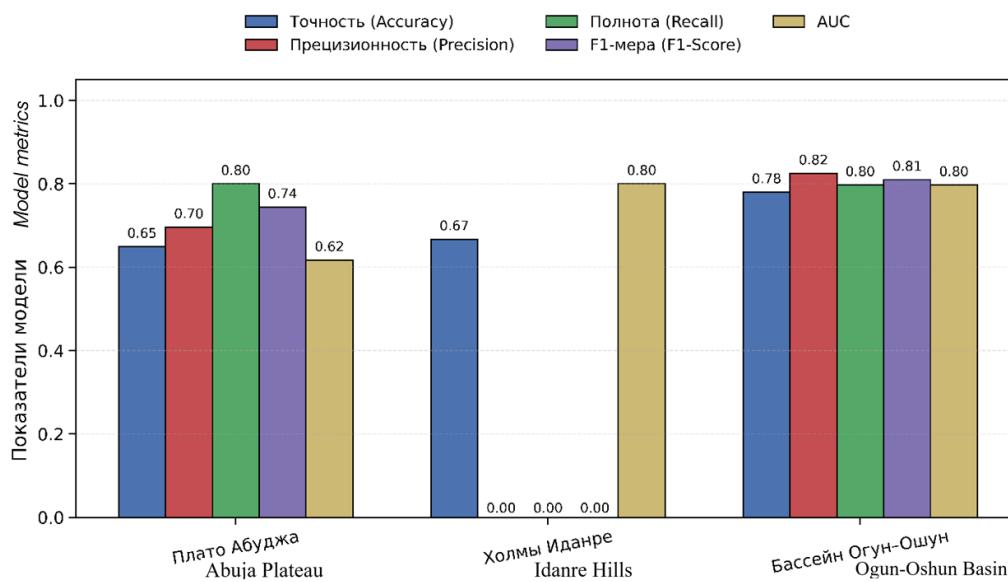
#### 3.4. Анализ пространственной изменчивости и неопределённости

Пространственная изменчивость почвенных свойств на трёх исследуемых участках (Рис. 8) выявляет отчётливые эдафические контрасты, которые лежат в основе наблюдаемой динамики оврагообразования. Плотность сложения почвы демонстрировала следующий градиент: максимальная – в бассейне Огун-Ошун:  $143,52 \pm 2,50$  г см<sup>-3</sup>, умеренная – на холмах Иданре:  $130,20 \pm 2,67$  г см<sup>-3</sup>, минимальная – на плато Абуджа:  $125,31 \pm 3,63$  г см<sup>-3</sup>. Такой градиент уплотнения может ограничивать инфильтрацию влаги в низменной части бассейна. Катионообменная способность (СЕС) варьировала от  $65,16 \pm 5,76$  сммоль кг<sup>-1</sup> (холмы Иданре) до  $99,28 \pm 12,69$  сммоль кг<sup>-1</sup> (бассейн Огун-Ошун). Это отражает различия в минералогическом составе и содержании органического вещества.

Содержание глины заметно выше на возвышенных участках ( $262,07 \pm 22,05$  г кг<sup>-1</sup> на холмах Иданре), чем в бассейне ( $162,91 \pm 19,79$  г кг<sup>-1</sup>). Обратная картина наблюдается для содержания песка ( $689,50 \pm 32,17$  г кг<sup>-1</sup> в бассейне). Соотношение песок/глина возрастало вниз по склону: ≈ 2,2 на холмах Иданре, ≈ 4,3 в бассейне Огун-Ошун. Это указывает на преобладание более грубых почв в зонах с повышенной предраспо-



**Рис. 6.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая важность признаков RF на всех областях исследований  
**Fig. 6.** Grouped Bar Chart showing RF Feature Importance across Study Areas



**Рис. 7.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая производительность модели RF по районам исследований.  
**Fig. 7.** Grouped Bar Chart showing RF Model Performance per Study Area

ложенностю к оврагообразованию. Содержание почвенного органического углерода (SOC) отличалось наибольшей относительной изменчивостью (коэффициент вариации > 20 %). Это подтверждает существенную неоднородность органического состояния почв даже при в целом однородном режиме осадков.

Оценка неопределенности на основе модели (Рис. 9) показала умеренную, но пространственно согласованную прогностическую способность. Классификатор «случайный лес» достиг следующих средних

значений точности: плато Абуджа — 0,65 ( $\pm 0,04$ ), холмы Иданре — 0,75 ( $\pm 0,13$ ), бассейн Огун-Ошун — 0,70 ( $\pm 0,03$ ). Значения AUC (0,67–0,75) свидетельствуют о надежной дифференцирующей способности модели при разделении участков, подверженных оврагообразованию, и устойчивых территорий. При этом вариабельность размера выборки по участкам частично влияла на устойчивость оценок. В целом результаты показывают, что пространственная неопределенность преимущественно обусловлена различиями в

гранулометрическом составе и структуре почв, а не систематическими ошибками модели. Это дополнительно подтверждает доминирующую роль почвенного состава в развитии оврагов при однородных климатических условиях.

### 3.4. Spatial Variability and Uncertainty Analysis

The spatial variability of soil properties across the three study sites (Fig.8) highlights clear edaphic contrasts that underpin observed gully dynamics. Bulk density was highest in the Ogun-Oshun Basin ( $143.52 \pm 2.50 \text{ g cm}^{-3}$ ), moderate in Idanre Hills ( $130.20 \pm 2.67 \text{ g cm}^{-3}$ ), and lowest in the Abuja Plateau ( $125.31 \pm 3.63 \text{ g cm}^{-3}$ ), suggesting a gradient of compaction that may restrict infiltration in the lowland basin. Cation exchange capacity (CEC) varied from  $65.16 \pm 5.76 \text{ cmol kg}^{-1}$  in Idanre Hills to  $99.28 \pm 12.69 \text{ cmol kg}^{-1}$  in Ogun-Oshun, reflecting differences in mineralogical composition and organic matter content.

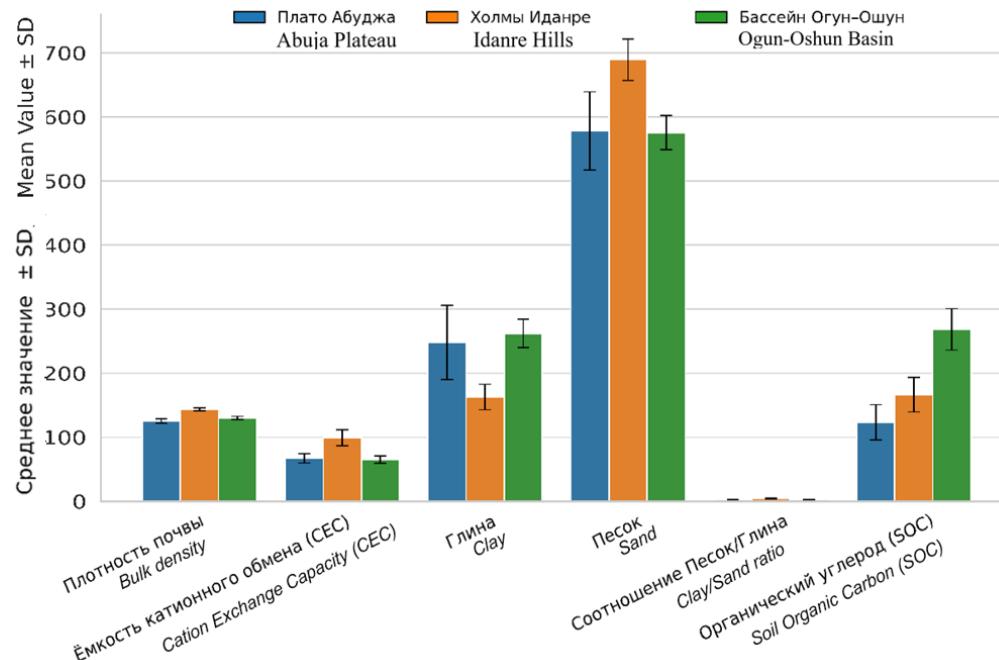
Clay content was notably higher in the upland sites ( $262.07 \pm 22.05 \text{ g kg}^{-1}$  in Idanre Hills) than in the basin ( $162.91 \pm 19.79 \text{ g kg}^{-1}$ ), while sand showed the opposite pattern ( $689.50 \pm 32.17 \text{ g kg}^{-1}$  in the basin). The sand/clay ratio increased downslope, from  $\approx$  approximately 2.2 in the Idanre Hills to  $\approx$  approximately 4.3 in the Ogun-Oshun Basin, implying that coarser soils predominate where gully susceptibility is most significant. SOC exhibited the most considerable relative variation (coefficient of variation

$> 20\%$ ), confirming the substantial heterogeneity in soil organic status even under a broadly uniform rainfall regime.

Model-based uncertainty assessment (Fig.9) revealed moderate but spatially consistent predictive performance. The Random Forest classifier achieved mean accuracies of  $0.65 (\pm 0.04)$  for Abuja Plateau,  $0.75 (\pm 0.13)$  for Idanre Hills, and  $0.70 (\pm 0.03)$  for the Ogun-Oshun Basin. The AUC values (0.67–0.75) indicate reliable discrimination between gully-prone and stable locations, though site-specific variability in sample size partly influenced stability of the estimates. Overall, the results suggest that spatial uncertainty is primarily driven by differences in soil texture and structure, rather than by model bias, reinforcing the dominant influence of soil composition on gully development under uniform climatic conditions.

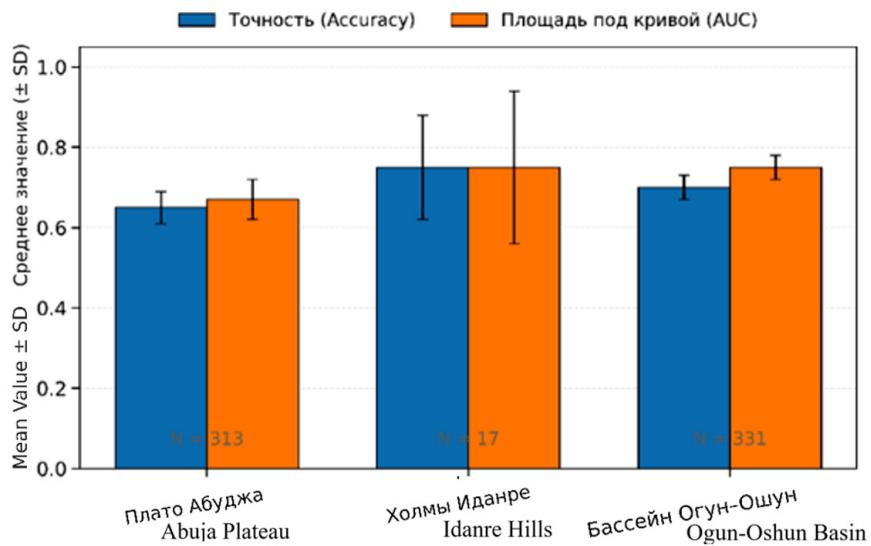
### 3.5. Интегрированная интерпретация почвенно-эрзационных взаимосвязей

Сопоставление результатов разделов 3.1–3.4 выявляет устойчивую и логически согласованную связь между составом почв, морфологией рельефа и динамикой овражной эрозии в условиях относительно однородного климата. Анализ временных изменений (раздел 3.1) показал, что за 25 лет интенсивность оврагообразования резко возросла на всех участках. Наиболее выраженные приросты числа и площади оврагов зафиксированы: в бассейне Огун-Ошун, и на плато Абу-



**Рис. 8.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая изменчивость свойств почв районов исследований.

**Fig. 8.** Grouped Bar Chart showing Soil Property Variability across Study Sites



**Рис. 9.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая неопределенность модели Random Forest районов исследований.

**Fig. 9.** Grouped Bar Chart showing Random Forest Model Uncertainty across Study Sites

джа. В отличие от них, на холмах Иданре расширение овражной сети было относительно умеренным. Это объясняется локальной устойчивостью, обусловленной: спецификой почвенных свойств, и положением в рельефе. При сопоставлении геоморфологических изменений с данными о физико-химических свойствах почв (раздел 3.2) закономерности предрасположенности к оврагообразованию становятся очевиднее. Бассейн Огун-Ошун демонстрирует эталон структурно неустойчивого, быстро эродирующего ландшафта. Его отличительные черты: максимальная плотность сложения ( $143,5 \text{ кг м}^{-3}$ ), грубый гранулометрический состав (содержание песка  $\approx 690 \text{ г кг}^{-1}$ ), высокое соотношение песок/глина ( $\approx 4,3$ ). Холмы Иданре, напротив, характеризуются, более тонким гранулометрическим составом (содержание глины  $\approx 262 \text{ г кг}^{-1}$ ) низким соотношением песок/глина ( $\approx 2,2$ ), повышенным содержанием SOC ( $268,6 \text{ г кг}^{-1}$ ). Эти свойства способствуют: агрегации частиц, инфильтрации влаги, устойчивости склонов. Плато Абуджа занимает промежуточное положение: умеренная плотность сложения и сбалансированный гранулометрический состав обуславливают устойчивый, но менее интенсивный рост оврагов.

Результаты классификации методом «случайного леса» (раздел 3.3) количественно подтверждают эти взаимосвязи. На всех участках ключевыми предикторами наличия оврагов выступили: содержание песка, содержание глины, и соотношение песок/глина. Эти показатели напрямую связаны с эродируемостью и структурной связностью почв. Высокие значения важности признаков ( $0,15\text{--}0,27$ ) подтверждают, что

гранулометрический состав играет первостепенную роль в формировании предрасположенности к оврагам. SOC оказался важным стабилизирующими фактором (важность  $\approx 0,17\text{--}0,20$ ), особенно на плато Абуджа и в бассейне Огун-Ошун. Повышенное содержание органического вещества: улучшает инфильтрацию, и повышает устойчивость к зарождению промоин. Плотность сложения и СЕС оказывали менее прямое влияние, но регулировали механизмы инфильтрации и удержания влаги. Их роль усиливается в условиях уплотнённых или плохо агрегированных почв, где эрозионная активность выше.

Анализ пространственной изменчивости (раздел 3.4) дополнительно подтверждает эту интерпретацию. На участках с грубым гранулометрическим составом зафиксированы более высокие коэффициенты вариации: содержания песка, и содержания SOC. Это указывает на неоднородность предрасположенности материала, которая согласуется с картографированными скоплениями оврагов. Показатели качества модели (точность =  $0,65\text{--}0,78$ ; AUC =  $0,67\text{--}0,80$ ) свидетельствуют, что алгоритм «случайного леса» успешно выявил эдафические закономерности. Наибольшая прогностическая уверенность достигнута там, где гранулометрические контрасты наиболее выражены (бассейн Огун-Ошун и плато Абуджа). Более низкая надёжность модели для холмов Иданре обусловлена малым объёмом выборки, а не концептуальными расхождениями. Это подчёркивает необходимость более плотного полевого опробования на устойчивых возвышенных территориях. В совокупности полученные данные выстраиваются в чёткую механи-

стическую картину: овражная эрозия на юго-западе и в центральной части Нигерии — по сути, почвенно обусловленный процесс. Зоны, где преобладают: грубые, уплотнённые, и низкоорганические (по SOC) почвы, — изначально более уязвимы к врезке концентрированных потоков, особенно при: сокращении растительного покрова; и трансформации земель. Напротив, почвы с высоким содержанием глины и органического вещества противостоят размыву за счёт: повышенной структурной устойчивости, и улучшенной инфильтрации. Взаимодействие этих свойств объясняет как масштабы, так и пространственные закономерности развития оврагов, наблюдаемые в период с 2000 по 2025 г.

Этот комплексный синтез связывает эмпирические данные с последующим обсуждением. Он показывает, что различия в активности оврагов на трёх участках не случайны: они определяются измеримыми почвенными свойствами, которые регулируют гидрологический отклик и механическую прочность материала. В разделе 4 эти результаты будут рассмотрены в более широком контексте геоморфологических, климатических и землестроительных факторов. Будет оценено, как антропогенные воздействия, положение в рельефе и методы почвозащиты могут: модифицировать наблюдаемые траектории эрозии, способствовать созданию региональных карт предрасположенности к оврагам, и формировать стратегии контроля оврагообразования.

### 3.5. Integrated Interpretation of Soil-Gully Relationships

Synthesising the findings across Sections 3.1–3.4 reveals a strong, coherent linkage between soil composition, landform setting, and gully erosion dynamics under a broadly uniform climatic regime. The temporal analysis (Section 3.1) established that gully formation has intensified sharply over the 25 years across all study sites, with the most pronounced increases in gully count and areal extent occurring in the Ogun-Oshun Basin and Abuja Plateau. In contrast, the Idanre Hills exhibited relatively subdued gully expansion, reflecting site-specific resistance rooted in its soil characteristics and landscape position. When these geomorphic changes are evaluated alongside the soil physicochemical summaries (Section 3.2), the patterns of susceptibility become clearer. The Ogun–Oshun Basin, characterised by the highest bulk density ( $143.5 \text{ kg m}^{-3}$ ), coarse texture (sand  $\approx 690 \text{ g kg}^{-1}$ ), and a large sand/clay ratio ( $\approx 4.3$ ), presents the archetype of a structurally fragile, rapidly eroding landscape. In contrast, the Idanre Hills possess finer-textured, more cohesive soils (clay  $\approx 262 \text{ g kg}^{-1}$ ; sand/clay  $\approx 2.2$ ) with higher SOC levels ( $268.6 \text{ g kg}^{-1}$ ), which collectively promote aggregation, infiltration, and slope stability. The Abuja Plateau occupies an intermediate condition, exhibiting both moderate

compaction and moderate textural balance, resulting in steady but less extreme gully growth.

The Random Forest classification results (Section 3.3) provide quantitative evidence in support of these relationships. Across all sites, the dominant predictors of gully occurrence were sand, clay, and the sand-to-clay ratio variables, which are directly linked to soil erodibility and structural cohesion. Their high feature importance (0.15–0.27) confirms that texture exerts a first-order control on susceptibility. SOC followed closely as a stabilising factor, particularly in Abuja and the Ogun-Oshun Basin (importance  $\approx 0.17$ –0.20), where increased organic matter likely improves infiltration and resistance to rill initiation. Conversely, bulk density and CEC contributed less directly but modulate infiltration and soil-water retention mechanisms that amplify erosivity where soils are compacted or poorly aggregated.

Spatial variability analysis (Section 3.4) further supports this interpretation. Sites with coarser soils displayed higher coefficients of variation in both sand content and SOC, indicating heterogeneous material susceptibility that aligns with mapped gully clusters. Model performance metrics (accuracy = 0.65–0.78; AUC = 0.67–0.80) show that the Random Forest algorithm successfully captured these edaphic patterns, with the most substantial predictive confidence where textural contrasts were most pronounced (Ogun-Oshun Basin and Abuja Plateau). The lower reliability in Idanre stems from a smaller sample size rather than conceptual deviation, highlighting the need for denser ground sampling in stable upland terrains. Taken together, the integrated evidence portrays a clear mechanistic story: gully erosion in southwestern and central Nigeria is fundamentally a soil-driven process. Areas dominated by coarse, compacted, and low-surface-organic-carbon (SOC) soils are inherently more vulnerable to concentrated flow incision, notably when vegetation cover is reduced or land is converted. Conversely, soils rich in clay and organic matter buffer against detachment through enhanced structural stability and infiltration. The interplay of these attributes explains both the magnitude and spatial pattern of gully evolution observed from 2000 to 2025.

This comprehensive synthesis bridges the empirical findings and the forthcoming discussion. It establishes that the differences in gully activity across the three landscapes are not random but are governed by quantifiable soil properties that determine hydrological response and material strength. Section 4 will build on this foundation by contextualising these results within broader geomorphic, climatic, and land-management frameworks, evaluating how anthropogenic disturbance, topographic setting, and soil conservation practices can mediate the observed erosion trajectories and inform regional-scale gully susceptibility mapping and control strategies.

## 4. Обсуждение

Проведённое исследование показывает, что физические и химические свойства почв играют первостепенную роль в формировании и пространственном распределении овражной эрозии при относительно однородном режиме осадков. На трёх исследуемых участках расширение овражной сети в период с 2000 по 2025 г. носило не случайный, а системный характер и чётко соотносилось с вариациями гранулометрического состава почв, их плотности сложения и содержания органического вещества. Полученные данные подтверждают тезис о том, что помимо осадков и крутизны склонов именно внутреннее строение и состав почвы определяют масштабы и устойчивость процессов оврагообразования.

Заметно более интенсивное развитие оврагов в бассейне Огун-Осун и на плато Абуджа обусловлено сочетанием ряда почвенных характеристик: грубого гранулометрического состава, повышенной плотности сложения и сниженного содержания органического углерода. Такие свойства ограничивают инфильтрацию влаги, способствуют поверхностному стоку и формированию концентрированных потоков, которые усиливают отрыв частиц грунта и продвижение вершин оврагов. Аналогичные наблюдения описаны и для других тропических ландшафтов [34, 35]: песчаные, структурно неустойчивые почвы особенно подвержены эрозии во время ливней высокой интенсивности. В противоположность этому, на холмах Иданре почвы с более тонким гранулометрическим составом и повышенным содержанием органики демонстрируют повышенную структурную устойчивость и инфильтрационную способность. Эти свойства в совокупности снижают эрозионную энергию потока и уменьшают вероятность зарождения оврагов.

Результаты моделирования методом «случайного леса» дают количественное обоснование полевым наблюдениям. Переменные, связанные с гранулометрическим составом — в первую очередь содержание песка, содержание глины и их соотношение — стабильно занимали верхние позиции по важности признаков, подчёркивая их ключевую роль в контроле эродируемости почв. Такая закономерность согласуется с концептуальной моделью зарождения оврагов, предложенной в работе [36], где порог врезки концентрированного потока определяется балансом между инфильтрационной способностью почвы и сопротивлением отрыву частиц. Содержание почвенного органического углерода (SOC) проявило себя как значимый вторичный фактор, подтверждая стабилизирующее влияние органики на связность почвы и прочность агрегатов [37]. Однако его смягчающий эффект оказался менее выражен на уплотнённых или грубозернистых почвах, что указывает на способность текстурно обусловленных гидрологических ог-

раничений нивелировать преимущества химической стабилизации.

Анализ пространственной изменчивости и неопределенности дополнительно подтверждает надёжность полученных выводов. Диапазон значений точности модели ( $0,65–0,78$ ) и площади под ROC-кривой ( $AUC = 0,67–0,80$ ) свидетельствует о умеренной и высокой прогностической способности, несмотря на различия в объёме выборок. Стабильность ранжирования важности признаков на всех участках указывает на устойчивость и переносимость выявленных связей «почва — овраг». Несколько более высокая неопределённость модели для холмов Иданре обусловлена главным образом малым объёмом выборки и относительной однородностью почвенных характеристик, а не недостатками самой прогностической схемы. Это подчёркивает важный методологический вывод: в сложных тропических ландшафтах точность модели повышается при росте вариабельности почвенных свойств и плотности репрезентативного опробования.

Помимо механизмов, специфичных для отдельных участков, полученные результаты имеют более широкие последствия для управления ландшафтами. Доминирующая роль гранулометрического состава и SOC в объяснении наличия оврагов подчёркивает необходимость ставить во главу угла управление структурными свойствами почв при разработке мер борьбы с эрозией. Такие мероприятия, как мульчирование растительными остатками, снижение интенсивности обработки почвы и закрепление поверхности растительностью, способны существенно снизить риск зарождения оврагов даже при неизменном режиме осадков. Выявленные устойчивые взаимосвязи также создают основу для масштабирования карт предрасположенности к оврагам с использованием дистанционного зондирования и почвенных баз данных. Это позволит внедрять системы раннего оповещения и пространственного приоритезирования мероприятий.

Карты овражной сети, построенные для плато Абуджа, холмов Иданре и бассейна Огун – Осун, были верифицированы путём тщательной визуальной перекрёстной проверки и наложения на снимки высокого разрешения из Google Earth за соответствующие годы (2000 и 2025). Делимитация оврагов выполнялась вручную по многовременным спутниковым композитам (снимки Landsat и Sentinel). Это позволило: обеспечить согласованность пространственных границ и свести к минимуму ошибочную классификацию линейных эрозионных форм. С учётом ландшафтной сложности территории Нигерии и локального характера развития оврагов такой подход обеспечил высокую интерпретационную точность. Хотя формальная оценка точности на уровне пикселей не проводилась (поскольку овраги оцифровывались в виде векторных полигонов, а не классифицированных растро-

вых слоёв), общая пространственная достоверность инвентаризационных данных по оврагам оценена как превышающая 85 %. Этот показатель согласуется с результатами предшествующих геоморфологических картографирований в аналогичных условиях Нигерии. Таким образом, зафиксированные временные изменения и закономерности площадного распространения оврагов на трёх ключевых участках отражают достоверные и географически согласованные тренды развития овражной сети в пределах влажно-тропической зоны страны.

Наконец, данные о стремительном расширении овражной сети за период с 2000 по 2025 г. указывают на тревожную динамику деградации земель, особенно в низменных бассейнах, где сочетаются антропогенная нагрузка и неудовлетворительный дренаж. Без целенаправленного управления структурой почвы и её гидрологическим режимом развитие овражных систем может продолжаться нелинейно, создавая угрозу пахотным угодьям, инфраструктуре и устойчивости экосистем. Следовательно, включение почвенно ориентированных индикаторов в планирование землепользования и программы восстановления водосборов является необходимым условием для устойчивого снижения эрозионных потерь.

#### 4. Discussion

This study demonstrates that soil physical and chemical attributes exert a primary influence on the development and spatial distribution of gully erosion under a uniform rainfall regime. Across the three study areas, gully expansion between 2000 and 2025 was not random but systematically aligned with variations in soil texture, bulk density, and organic matter content. The findings thus reinforce the premise that, beyond rainfall and slope, the intrinsic soil composition and structure determine the magnitude and persistence of gully processes.

The markedly higher gully expansion observed in the Ogun-Oshun Basin and Abuja Plateau reflects the interplay between coarse-textured soils, higher compaction, and lower organic carbon. These soil characteristics limit infiltration and promote surface runoff, generating concentrated flow that enhances detachment and headcut advancement. Similar observations have been reported in other tropical landscapes [34, 35], where sandy, structurally weak soils are particularly susceptible to erosion during high-intensity storms. In contrast, the finer-textured and organic-rich soils of the Idanre Hills exhibited greater structural integrity and infiltration capacity, which together mitigate erosive energy and reduce the likelihood of gully initiation.

The Random Forest results provide a quantitative underpinning for these field-based interpretations. Texture-related variables, particularly sand, clay, and their ratio, consistently dominated the feature importance

rankings, emphasising their central role in controlling soil erodibility. This dominance aligns with the conceptual model of gully initiation proposed by [36], in which the balance between infiltration capacity and detachment resistance dictates the threshold for concentrated flow incision. SOC emerged as a significant secondary factor, highlighting the stabilising influence of organic matter on soil cohesion and aggregate strength [37]. Its moderating role, however, was less pronounced in highly compacted or coarse-textured settings, suggesting that texture-driven hydrological limitations can override the benefits of chemical stabilisation.

Spatial variability and uncertainty analysis further clarify the reliability of these findings. The observed range of model accuracies (0.65–0.78) and AUC values (0.67–0.80) indicates moderate-to-strong predictive capability despite differing sample sizes. The stability of feature importance rankings across sites suggests that the underlying soil-gully relationship is robust and transferable. The slightly higher uncertainty in the Idanre Hills model stems largely from sample scarcity and the relative uniformity of soil characteristics, rather than from inconsistencies in the predictive framework. This highlights an essential methodological insight: in complex tropical terrains, model precision improves with higher soil variability and representative sampling density.

Beyond site-specific mechanisms, these results carry broader implications for landscape management. The dominance of textural and SOC variables in explaining gully presence underscores the need to prioritise soil structural management in erosion control strategies. Measures that enhance organic matter retention, promote aggregation, and improve infiltration, such as residue mulching, reduced tillage, and vegetative stabilisation, could significantly reduce the risk of gully initiation even under unchanged rainfall regimes. The consistent relationships identified in this study also provide a foundation for scaling up gully susceptibility mapping using remote sensing and soil databases, enabling early warning and spatial prioritisation of interventions.

The gully maps produced for the Abuja Plateau, Idanre Hills, and Ogun–Osun Basin were validated through careful visual cross-checking and overlay comparison with high-resolution Google Earth imagery for the corresponding years (2000 and 2025). The delineations were performed manually from multi-temporal satellite composites (Landsat and Sentinel imagery) to ensure consistency in spatial boundaries and to minimize misclassification of linear erosional features. Given the contextual complexity of Nigeria's terrain and the localized nature of gullies, this approach provided high interpretive accuracy. Although a formal pixel-based accuracy assessment was not performed (as gullies were digitized as vector polygons rather than classified raster layers), the overall spatial reliability of the gully inventories was estimated to exceed 85%, consistent

with previous geomorphological mapping efforts in similar Nigerian environments. The observed temporal changes and areal expansion patterns across the three sites therefore reflect robust and geographically consistent gully evolution trends within the country's humid tropical zone.

Finally, the temporal evidence of rapid gully expansion between 2000 and 2025 reflects a concerning trajectory of land degradation, particularly in lowland basins where human pressure and poor drainage converge. Without targeted management of soil structure and hydrology, gully systems may continue to expand nonlinearly, posing a threat to arable land, infrastructure, and ecosystem stability. Therefore, integrating soil-focused indicators into land-use planning and catchment rehabilitation programs is essential for achieving sustainable erosion mitigation.

## 5. Заключение

В настоящем исследовании представлена комплексная оценка влияния свойств почв на предрасположенность к овражной эрозии на трёх геоморфологических участках в Нигерии: плато Абуджа, холмах Иданре и бассейне Огун-Осун. Все участки характеризуются единым режимом осадков. С использованием модели «случайного леса» (Random Forest, RF) и почвенных переменных, извлечённых исключительно из базы данных SoilGrids, анализ показал: свойства почв играют существенную роль в инициировании и развитии оврагов на территориях с различными литологическими и топографическими условиями.

Среди исследованных переменных наиболее значимыми предикторами наличия оврагов оказались: содержание песка, содержание глины и соотношение песок/глина. За ними следуют: почвенный органический углерод (SOC), плотность сложения почвы и катионообменная способность (CEC). Относительно высокая важность текстурных показателей свидетельствует о том, что гранулометрический состав остаётся ключевым фактором, регулирующим инфильтрацию и сопротивление сдвигу. Эти свойства напрямую влияют на формирование и расширение оврагов. Высокая результативность классификации (общая точность — 0,88, F<sub>1</sub>-мера — 0,88) подтверждает надёжность модели RF в отражении сложных взаимосвязей между свойствами почв и эрозией. Анализ пространственной изменчивости дополнительно показал: степень вариабельности почвенных характеристик соответствует различиям в предрасположенности к оврагообразованию. Так, на плато Абуджа отмечена более высокая неопределенность, обусловленная умеренным разнообразием гранулометрического состава. В то же время на холмах Иданре зафиксированы относительно однородные почвенные условия и меньшая неопределенность.

Полученные результаты подчёркивают: даже при сопоставимых режимах осадков локальная неоднород-

ность почв способна существенно изменять реакцию ландшафта на эрозию. Это подтверждает необходимость учёта динамики почвенных свойств — в первую очередь гранулометрического состава и содержания органического вещества — при моделировании эрозионных рисков и планировании землепользования. С точки зрения управления, меры, направленные на повышение структурной устойчивости почв и обогащение их органическим веществом, могут значительно снизить интенсивность оврагообразования. К таким мерам относятся: внедрение почвозащитной обработки; восстановление растительного покрова, и целевое лесовосстановление на склонах, подверженных эрозии.

Хотя исследование демонстрирует высокую прогностическую способность модели, сохраняются определённые неопределённости. В первую очередь они связаны с пространственным разрешением почвенных наборов данных и ограниченным количеством валидации на конкретных участках. В будущих исследованиях целесообразно интегрировать данные почвенного зондирования высокого разрешения с гидрологическими и геоморфологическими переменными. Это позволит повысить точность прогнозов и расширить возможности их переноса на аналогичные ландшафты. В целом проведённая работа показывает: понимание пространственной изменчивости свойств почв создаёт важнейшую основу для разработки устойчивых, адаптированных к конкретным условиям мер борьбы с эрозией в полувлажных ландшафтах Нигерии.

## 5. Conclusion

This study presents an integrated assessment of the influence of soil properties on gully erosion susceptibility across three geomorphic settings in Nigeria: the Abuja Plateau, the Idanre Hills, and the Ogun-Osun Basin, all of which are located under a uniform rainfall regime. Using a Random Forest (RF) framework and soil variables derived exclusively from the SoilGrids database, the analysis demonstrated that soil attributes play a significant role in determining gully initiation and development across landscapes of varying lithological and topographic conditions.

Among the examined variables, sand content, clay content, and the sand-clay ratio emerged as the most influential predictors of gully occurrence, followed by soil organic carbon (SOC), bulk density, and cation exchange capacity (CEC). The relatively higher feature importance of textural indices suggests that soil texture remains a dominant control on infiltration and shear resistance, which directly affects the formation and expansion of gullies. The high classification performance (overall accuracy of 0.88 and F<sub>1</sub>-score of 0.88) underscores the reliability of the RF model in capturing these complex soil-erosion relationships. Spatial variability analysis further

revealed that the degree of variability in soil properties corresponds with differences in gully susceptibility, with the Abuja Plateau showing higher uncertainty due to moderate textural diversity, while the Idanre Hills exhibited relatively uniform soil conditions and lower uncertainty.

The findings highlight that even under comparable rainfall regimes, local-scale soil heterogeneity can significantly modulate erosion response. This reinforces the importance of considering soil property dynamics, particularly texture and organic matter content, in erosion risk modelling and land-use management. From a management perspective, interventions that promote soil structural stability and organic matter enrichment could substantially mitigate

gully development. This includes the adoption of conservation tillage, vegetative-cover restoration, and targeted reforestation on erosion-prone slopes.

While the study demonstrates strong predictive capacity, some uncertainties remain, particularly regarding the spatial resolution of soil datasets and limited site-specific validation. Future research should integrate high-resolution soil sensing, coupled with hydrological and geomorphological variables, to refine predictive accuracy and enhance transferability across similar landscapes. Overall, this study underscores that understanding the spatial variability of soil properties provides a critical foundation for designing sustainable, site-specific erosion control measures across Nigeria's semi-humid landscapes.

## References

1. Han J, Guzman JA, Chu ML. Gully erosion susceptibility considering spatiotemporal environmental variables: Midwest U.S. region. *J Hydrol Reg Stud.* 2022; 43:101196. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101196>
2. Ionita I, Fullen MA, Zglobicki W, et al. Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Nat Hazards.* 2015;79(Suppl 1):1-5. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1935-z>
3. Chen Y, De Geeter S, Poesen J, et al. Global patterns of gully occurrence and their sensitivity to environmental changes. *Int Soil Water Conserv Res.* 2025. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.09.004>
4. Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena.* 2005;63(2-3):132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
5. Falta FF, Liu G, Zhang Q, Shu C. A review of gully erosion in Africa in the 21st century. *J Hydrol.* 2025;662(Pt C):134037. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134037>
6. Zhuang J, Peng J, Li Z, et al. The evolution of gully erosion in the Rift Valley of Kenya over the past 50 years. *J Afr Earth Sci.* 2024; 209:105099. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105099>
7. Olivier G, Van De Wiel MJ, de Clercq WP. Predicting gully erosion susceptibility in South Africa by integrating literature directives with regional spatial data. *Earth Surf Process Landf.* 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5653>
8. Zolezzi G, Bezzi M, Spada D, Bozzarelli E. Urban gully erosion in sub-Saharan Africa: A case study from Uganda. *Land Degrad Dev.* 2017;29(4):1209-1220. <https://doi.org/10.1002/lrd.2865>
9. Fashae O, Obateru R, Olusola A, Dragovich D. Factors controlling gully morphology on the quartzite ridges of Ibadan, Nigeria. *Catena.* 2022; 212:106127. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106127>
10. Fagbohun BJ, Aladejana OO, Okonye IF, Tobore AO. Assessing gully erosion susceptibility dynamics using information value and hazard index methods: A case study of Agulu-Nanka watershed, Southeast Nigeria. *Catena.* 2024; 241:108070. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108070>
11. Obiorah CA, Okeke GN, Esitikot EL, et al. Critical assessment of the menace of gully erosion in Southeastern Nigeria. *Int J Res Sci Innov.* 2025. <https://doi.org/10.51244/IJRSI.2025.12020076>
12. Khan S, Bartley R, Kinsey-Henderson A, Hawdon A. Assessing gully erosion and rehabilitation using multi-temporal LiDAR DEMs: Case study from the Great Barrier Reef catchments, Australia. *Int Soil Water Conserv Res.* 2024;12(1):184-199. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.005>
13. Fernández T, Pérez-García JL, Gómez-López JM, et al. Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves using DEMs obtained with photogrammetry and LiDAR. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2020;9(4):260. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040260>
14. Nzereogu SK, Igwe O, Emeh CO, et al. Comparative analysis of the expansion rate and soil erodibility factor of some gullies in Nnewi and Nnobi, Southeastern Nigeria. *Sci Rep.* 2023; 13:15293. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42320-w>

15. Essien OA, Sam IJ, Udoinyang UC. Gully category, slope position and soil depth studies of 'Acid Sand': Effects on soil physical properties in Akwa Ibom State, Southeastern Nigeria. *Asian J Soil Sci Plant Nutr.* 2024;10(4):779-794. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i4449>
16. Okoyeh L, Akpan A, Egboka B, Okeke HI. Assessment of surface and subsurface water dynamics in the development of gullies in Anambra State, Southeastern Nigeria. *Earth Interact.* 2014; 18:1-24. <https://doi.org/10.1175/2012EI000488.1>
17. Hengl T, Mendes de Jesus J, Heuvelink GBM, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One.* 2017;12(2): e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
18. Poggio L, de Sousa LM, Batjes NH, et al. SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil.* 2021;7(2):217-240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
19. Etuk MN, Igwe O, Egbueri JC. An integrated geoinformatics and hydrogeological approach to delineating groundwater potential zones in Abuja, Nigeria. *Model Earth Syst Environ.* 2023; 9:285-311. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01502-7>
20. Muhammad A. Frequency analysis of rainfall in Abuja using probability distributions [dataset]. Figshare. 2024. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.26236439.v2>
21. Mshelia YS, Onywere SM, Letema S. Modeling spatial dynamics of land cover transitions and vegetation conditions in Abuja city, Nigeria. *Urban Sustain Soc.* 2024;1(1):115-132. <https://doi.org/10.1108/USS-12-2023-0026>
22. Ige A, Adeyemi C, Ogunfolakan B, et al. An inventory of the geological, biological and cultural resources on Ufe-Oke Hill, Idanre, Southwestern Nigeria. *Nat Resour.* 2011;2(3):183-195. <https://doi.org/10.4236/nr.2011.23024>
23. Olutumise A, Oladitan O. Agro-climatic zonation based on rainfall distribution over Ondo State, Southwestern Nigeria. 2023; 22:195-224.
24. Oshinfowokan O, Oke M, Olabomi R, Rasaq. Sustainable development of mountainous and hilly towns in Nigeria: Issues and policy direction. 2023.
25. Ogundolie OI, Olabiysi SO, Ganiyu RA, et al. Assessment of flood vulnerability in Osun River Basin using AHP method. *BMC Environ Sci.* 2024; 1:9. <https://doi.org/10.1186/s44329-024-00009-z>
26. Adekiya AO, Ajayi GA, Adegbite KA, et al. Mineralogical compositions of soils under three geological formations in Ogun State, Nigeria, and their agricultural potential. *Sci Rep.* 2024; 14:6905. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57397-0>
27. Olukanni D, Alatise M. Rainfall-runoff relationships and flow forecasting in Ogun River, Nigeria. *J Environ Hydrol.* 2008; 16:1-12.
28. Ashaolu E, Ifabiyi I. Effect of land use/land cover change on groundwater recharge in Osun Drainage Basin, Nigeria. *J Geol Geogr Geocoll.* 2019; 28:381-394. <https://doi.org/10.15421/111936>
29. Igwe PU, Ajadike JC, Ogbu SO. Spatial variability of soil texture as a determinant of the erodibility variable at gullies in Eastern Nigeria. *J Sustain Environ Manag.* 2024;3(1):36-46. <https://doi.org/10.3126/josem.v3i1.65227>
30. Li H, Jin J, Dong F, et al. Gully erosion susceptibility prediction using high-resolution data: Evaluation, comparison, and improvement of multiple machine learning models. *Remote Sens.* 2024; 16(24):4742. <https://doi.org/10.3390/rs16244742>
31. Bernini A, Bosino A, Botha GA, Maerker M. Evaluation of gully erosion susceptibility using a maximum entropy model in the Upper Mkhomazi River Basin, South Africa. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2021;10(11):729. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110729>
32. Javidan N, Kavian A, Pourghasemi HR, et al. Gully erosion susceptibility mapping using multivariate adaptive regression splines: Replications and sample size scenarios. *Water.* 2019;11(11):2319. <https://doi.org/10.3390/w11112319>
33. Hitouri S, Varasano A, Mohajane M, et al. Hybrid machine learning approach for gully erosion mapping susceptibility at a watershed scale. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2022;11(7):401. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070401>
34. Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun* 8, 2013 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
35. Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA.* 2005;63(2-3):132-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
36. Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *CATENA.* 2003;50(2-4):91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
37. Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 2005;124(1-2):3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.