

GIS-based sustainability assessment of decentralized rural electrification in the Amazon region

case study Ecuador

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr.rer.nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

José Estuardo Jara Alvear

aus

Cuenca, Ecuador

Bonn, 2016

ABSTRACT

Decentralized rural electrification (DRE) is necessary for electricity supplies in remote and disadvantaged areas in the Amazon region and improvement of the living conditions of the people there. However, the sustainability of DRE is often challenged by an unfavorable policy environment, limited institutional and organizational capacities, restricted financial resources, users' cultural attitudes and values as well as technology and environmental constraints. This study investigates how geographic information system (GIS) and system thinking can be linked for assessing and simulating the sustainability of DRE to enable stakeholders to explore policy scenarios to ensure a long-term electricity supply while improving the peoples' wellbeing and protecting the environment. Research objectives were accomplished by applying an interdisciplinary, participatory and multi-method approach in the Ecuadorian Amazon as a case study.

The aspects that favor or hinder sustainable operation of DRE in the Ecuadorian Amazon were identified through semi-structured interviews with decision makers and a survey in households using solar home systems (SHS). DRE is influenced by an intertwined network of technological, economic, social, institutional and environmental aspects. This complexity was disclosed through a participatory system analysis identifying DRE as a system of interconnected variables that form mostly reinforcing feedback structures without self-regulation. Thus, the provision of electricity in the Ecuadorian Amazon is perceived as an unstable system, not self-sufficient, and politically, technically and financially dependent on external inputs. Therefore, DRE needs to be carefully monitored to provide a basis for proactive and participatory management of a sustainable electricity system.

Linking GIS with fuzzy cognitive mapping (FCM) and multi-criteria decision analysis (MCA) is demonstrated as being capable of capturing the complexity of DRE and assessing and simulating its sustainability in a participatory, systemic and spatial explicit manner. In a workshop with researchers, decision makers and the staff responsible for the solar program 'Yatsa li Etsari' in Morona Santiago, Ecuador, the viewpoints of the participants on sustainable DRE were integrated into a fuzzy cognitive map (system model) represented by a set of interconnected sustainability variables that allowed the simulation of the developing behavior of the DRE system and predicted future sustainability. Using data from the workshop and a household survey with users of SHS, MCA and GIS allowed the computation and mapping of sustainability for a spatial assessment of DRE at a regional scale and at different levels of aggregation, i.e. indicators, variables and sustainability indexes. The integration of GIS, FCM and MCA thus allowed scenario development and analysis in order to study long-term sustainability trends that might result from different interventions in the DRE system. Simulation results show that the proposed approach can be used to facilitate stakeholder discussions, as it immediately provides plausible outcomes and feedbacks that stakeholders can interpret and, if appropriate, they can revise or reset their ideas for policy interventions. The approach assesses DRE from perspectives other than the conventional, e.g. economic or technological, perspective and has the potential to serve as a learning tool for participatory decision making allowing insights that otherwise would not be possible.

GIS-basierte Bewertung der Nachhaltigkeit dezentraler ländlicher Elektrifizierung im Amazonasbecken: Fallstudie Ecuador

KURZFASSUNG

Dezentrale ländliche Elektrifizierung (DLE) spielt in den abgelegenen und unterentwickelten Gebieten Amazoniens eine wichtige Rolle, um die Stromversorgung zu gewährleisten und die Lebensqualität der Bevölkerung zu verbessern. Jedoch wird die Nachhaltigkeit von DLE durch widrige politische Rahmenbedingungen, niedriger institutioneller Organisationsgrad, begrenzte finanzielle Ressourcen, kulturelle Eigenheiten und Wertesysteme der Nutzer sowie technologische und umweltbedingte Einschränkungen in Frage gestellt.

Die vorliegende Studie untersucht, inwiefern geographische Informationssysteme (GIS) und Systemdenken in die Bewertung und Simulation der Nachhaltigkeit von DLE einfließen können, um Stakeholders die Möglichkeit zu geben, politische Szenarien durchzuspielen und zu erörtern, mit dem Ziel, die Stromversorgung langfristig zu sichern, die Lebensqualität der Bevölkerung zu verbessern und die Umwelt zu schützen. Dabei kam ein interdisziplinärer, partizipativer und multimethodischer Ansatz am Beispiel des ecuadorianischen Amazonasgebietes zur Anwendung. Die Faktoren, die eine nachhaltige Betreibung von DLE begünstigen, wurden durch Interviews mit Entscheidungsträgern und Befragungen von Haushalten, die Solar Home Systems (SHS) nutzen, ermittelt.

Die dezentrale ländliche Elektrifizierung wird von einem Netzwerk aus technologischen, ökonomischen, sozialen, institutionellen und umweltbezogenen Faktoren beeinflusst. Diese Komplexität wurde in einer partizipativen Systemanalyse erfasst, die DLE als ein System von miteinander verbundenen Variablen darstellt, das vorrangig durch verstärkende Rückkopplungseffekte ohne Selbstregulierung charakterisiert ist. Die Stromversorgung im ecuadorianischen Amazonasgebiet stellt ein instabiles System dar, das nicht autark ist und politisch, technisch und finanziell von externen Inputs abhängt. Daher muss DLE sorgfältig überwacht werden, wodurch die Basis für ein proaktives und partizipatives Management geschaffen wird.

Durch die Verknüpfung von GIS mit Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) und Multi Criteria decision Analysis (MCA) konnte die Komplexität von DLE aufgezeigt und deren Nachhaltigkeit partizipativ, systemisch und räumlich explizit untersucht und simuliert werden. In einem Workshop in Morona Santiago, Ecuador, mit Wissenschaftlern, Entscheidungsträgern und den Verantwortlichen des Solarenergieprogramms „Yatsa li Esari“ wurden die unterschiedlichen Einschätzungen von nachhaltigen DLE-Systemen als Nachhaltigkeitsvariablen in eine Fuzzy Cognitive Map“ (Systemmodell) integriert. Dadurch konnte das Entwicklungsverhalten von DLE-Systemen simuliert und deren Nachhaltigkeit prognostiziert werden. Die Verwendung von Daten aus dem Workshop und der Haushaltsbefragung mit Nutzern von SHS ermöglicht mit Hilfe von MCA und GIS die Simulation und Kartierung der Nachhaltigkeit von DLE auf regionaler Ebene sowie auf verschiedenen Aggregationsebenen wie z.B. Indikatoren, Variablen und Nachhaltigkeitsindizes. Basierend auf der Integration von GIS, FCM und MCA konnten

Szenarien erstellt und analysiert werden, die erlauben, die Nachhaltigkeit von DLE-Systemen unter verschiedenen Interventionen zu bewerten.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass der beschriebene Ansatz Stakeholderdiskussionen insofern unterstützt als unmittelbar mögliche Auswirkungen und Rückkopplungen aufgezeigt werden, die dann von den Stakeholders interpretiert werden und, wenn nötig, die Revision von geplanten politischen Interventionen ermöglichen. Der Ansatz beleuchtet DLE von einer Perspektive, die über die konventionellen ökonomischen und technologischen Betrachtungen hinaus geht. Er kann als Lernansatz für partizipative Entscheidungsprozesse genutzt werden und ermöglicht damit Erkenntnisse, die andernfalls nicht hätten gewonnen werden können.

Evaluación de la sostenibilidad basada en GIS de la electrificación rural descentralizada en la región Amazónica: Caso de estudio Ecuador.

RESUMEN

La electrificación rural descentralizada (ERD) es necesaria para el suministro de electricidad en áreas remotas y desfavorecidas de la región Amazónica, y así mejorar las condiciones de vida de su población. Sin embargo, la sostenibilidad de la ERD a menudo es amenazada por un entorno político desfavorable, capacidades institucionales y organizativas limitadas, actitudes y valores culturales de los usuarios, así como restricciones tecnológicas y medioambientales. Este estudio investiga como sistemas de información geográfico (SIG) y enfoques de pensamiento sistémico pueden ser integrados para la evaluación y simulación de la sostenibilidad de ERD que permita a los actores explorar escenarios y políticas para garantizar un suministro de electricidad a largo plazo que mejore el bienestar de la población y protección del medio ambiente. Los objetivos de esta investigación se lograron mediante la aplicación de un enfoque interdisciplinario, participativo y multi-método en la Amazonia ecuatoriana como caso de estudio.

Los aspectos que favorecen o dificultan la operación sostenible de ERD en la Amazonía ecuatoriana fueron identificados a través de entrevistas semiestructuradas con tomadores de decisión y encuestas en hogares que usan sistemas solares fotovoltaicos residenciales (SHS, de sus siglas en inglés). La ERD está influenciada por una red compleja de aspectos tecnológicos, económicos, sociales, institucionales y ambientales. Esta complejidad se explicó mediante un análisis de sistemas participativo identificando a la ERD como un sistema de variables interconectadas que forma mayoritariamente estructuras de retroalimentación reforzantes sin autorregulación. Por lo tanto, el suministro de electricidad en la Amazonía ecuatoriana es percibida como un sistema inestable, no autosuficiente y dependiente política, técnica y financieramente de insumos externos. Por lo tanto, la ERD debe monitorearse cuidadosamente para sentar las bases para una gestión proactiva y participativa de un sistema eléctrico sostenible.

Se demostró que la integración de SIG con el mapeo cognitivo difuso (FCM, de sus siglas en inglés) y el análisis de decisiones multi-criterio (MCA, de sus siglas en inglés) son capaces de capturar la complejidad de la ERD, evaluar y simular su sostenibilidad de una manera participativa, sistémica y espacial. En un taller con investigadores, tomadores de decisiones y personal responsable del programa solar 'Yatsa li Etsari' en Morona Santiago, Ecuador, los puntos de vista de los participantes sobre una ERD sostenible se integraron en un mapa cognitivo difuso (modelo del sistema), el cual fue representado por un conjunto de variables de sostenibilidad interconectadas que permitieron simular el comportamiento de desarrollo del sistema de la ERD y predecir la sostenibilidad futura. Utilizando datos del taller y de las encuestas de hogares que usan SHS, el MCA y SIG permitió el cálculo y mapeo de la sostenibilidad para una evaluación espacial de la ERD a una escala regional y a diferentes niveles de agregación, es decir, indicadores, variables e índices de sostenibilidad. La integración de SIG, FCM y MCA permitió así el desarrollo y análisis de escenarios con el fin de estudiar las

tendencias de la sostenibilidad a largo plazo que podrían resultar de diferentes intervenciones en el sistema de la ERD. Los resultados de la simulación demuestran que el enfoque propuesto puede utilizarse para facilitar discusiones entre los actores interesados, ya que proporciona inmediatamente resultados plausibles y retroalimentación que los actores pueden interpretar y, si es apropiado, pueden revisar o reajustar sus ideas para intervenciones políticas. El enfoque propuesto evalúa la ERD desde una perspectiva distinta de las convencionales, por ejemplo, económica o tecnológica; y tiene el potencial de servir como una herramienta de aprendizaje para la toma de decisiones participativa, permitiendo obtener conocimiento que de otro modo no sería posible.