

Libro de Investigaciones

Una colección de artículos científicos y estudios de investigación

Mauricio Romero

2025-09-01

Table of contents

Inicio

Bienvenido al **Libro de Investigaciones**, una colección de capítulos de investigación organizados en capítulos independientes.

Contenido

Capítulo 1: La Palma Seismicity 2021

En septiembre de 2021, un salto significativo en la actividad sísmica en la isla de La Palma (Islas Canarias, España) señaló el comienzo de una crisis volcánica. Este estudio analiza los datos de terremotos recopilados y publicados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), revelando sismicidad que se origina en dos profundidades distintas.

Capítulo 2: Evaluating the Transfer of Information in Phase Retrieval STEM Techniques

Este estudio evalúa métodos de recuperación de fase en microscopía electrónica de transmisión de barrido (STEM), analizando técnicas como imágenes del centro de masa, STEM de campo brillante corregido por inclinación y métodos ptychográficos directos.

Arquitectura del Proyecto

Esta implementación en **Quarto** ofrece:

- **Estabilidad garantizada:** Servidor web confiable y funcional
- **Navegación fluida:** Enlaces internos que funcionan correctamente
- **Formato científico:** Soporte nativo para ecuaciones, referencias y figuras
- **Exports múltiples:** HTML interactivo y PDF profesional
- **Live preview:** Actualización automática durante edición
- **Mantenimiento sencillo:** Configuración simple y robusta

Navegación

Utiliza la navegación lateral o los enlaces de capítulos para explorar los diferentes estudios de investigación incluidos en este libro.

Chapter 1

1. La Palma Earthquakes: Seismic Analysis of Volcanic Activity

Evidence for Multi-Reservoir Magma Systems

Chapter 2

Abstract

This study analyzes seismic activity associated with the 2021 La Palma volcanic eruption to investigate evidence for proposed multi-reservoir magma systems. Using earthquake data from the Instituto Geográfico Nacional, we examine spatial and temporal patterns of seismicity to validate theoretical models of magma storage and transport. Our analysis of 5,465 seismic events reveals distinct clustering at shallow (10-15 km) and deep (30-40 km) depths, providing strong evidence for both crustal and mantle magma reservoirs feeding the Cumbre Vieja volcanic system.

Chapter 3

1. Introduction

La Palma, situated in the westernmost region of the Canary Islands archipelago, represents one of Earth’s most active volcanic systems. Located approximately 100 km from the African coast, this Spanish territory exemplifies ongoing oceanic island formation processes. The island’s geological evolution has been dominated by multiple phases of volcanism, with the *Cumbre Vieja* volcanic ridge—a north-south oriented structure comprising the southern half of the island—representing the most recent and currently active phase.

Understanding volcanic earthquake patterns is crucial for eruption forecasting and hazard assessment. The 2021 eruption of Cumbre Vieja provided an exceptional opportunity to study real-time seismic signatures associated with magma movement through proposed multi-reservoir systems.

3.1 1.2 Historical Context and Volcanic Setting

3.1.1 Eruption History

The historical volcanic record of La Palma spans over five centuries, providing valuable insights into the long-term behavior of the Cumbre Vieja system. Since European colonization in the late 1400s, eight major eruptions have been documented, establishing patterns crucial for probabilistic hazard assessment.

Table 3.1: Recent historic eruptions on La Palma

Name	Year
Current	2021
Teneguía	1971
Nambroque	1949
El Charco	1712
Volcán San Antonio	1677
Volcán San Martin	1646
Tajuya near El Paso	1585
Montaña Quemada	1492

This equates to an eruption on average every 79 years up until the 1971 event. The probability of a future eruption can be modeled by a Poisson distribution:

$$p(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

Where λ is the number of eruptions per year, $\lambda = \frac{1}{79}$ in this case. The probability of a future eruption in the next t years can be calculated by:

$$p_e = 1 - e^{-t\lambda}$$

So following the 1971 eruption the probability of an eruption in the following 50 years — the period ending this year — was 0.469. After the event, the number of eruptions per year moves to $\lambda = \frac{1}{75}$ and the probability of a further eruption within the next 50 years (2022-2071) rises to 0.487 and in the next 100 years, this rises again to 0.736.

3.1.2 Theoretical Framework: Multi-Reservoir Magma Systems

Previous geophysical and petrological investigations have proposed a conceptual model involving two primary magma storage zones beneath Cumbre Vieja:

1. **Deep mantle reservoir** (30-40 km depth): Primary magma storage and differentiation zone
2. **Shallow crustal reservoir** (10-20 km depth): Secondary storage feeding eruptions

This hierarchical system suggests that magma ascends from the deep reservoir, undergoes further processing in the shallow chamber, and eventually reaches the surface during eruptions. Seismic monitoring provides a unique opportunity to test this model through analysis of earthquake depth distributions and temporal patterns.

Chapter 4

2. Objectives and Scope

This study aims to:

- Analyze spatial patterns of seismic activity to identify reservoir locations
- Examine temporal relationships between deep and shallow seismicity
- Evaluate the multi-reservoir model using observational data
- Contribute to improved eruption forecasting methodologies

Chapter 5

3.Methods and Data

5.0.1 Seismic Data Acquisition

Earthquake data were obtained from the Instituto Geográfico Nacional (IGN) web portal, representing publicly available information collected through a comprehensive network of seismic monitoring stations deployed across La Palma. The dataset encompasses the critical period from September 11 to November 9, 2021, capturing pre-eruptive, syn-eruptive, and post-eruptive phases.

5.0.2 Data Processing and Quality Control

Raw seismic catalogs were processed using automated web scraping protocols to ensure reproducibility and systematic data collection. Quality control measures included verification of event locations, magnitudes, and depth determinations.

5.0.3 Analytical Framework

Statistical analysis focused on: - Spatial distribution of hypocenters - Temporal evolution of seismic activity
- Depth-magnitude relationships - Clustering analysis for reservoir identification

Chapter 6

3. Results and Analysis

6.0.1 Dataset Characteristics

Analysis of the complete IGN catalog yielded 5,465 seismic events specifically attributed to La Palma during the study period. These data were systematically analyzed across multiple dimensions: spatial distribution, temporal evolution, magnitude characteristics, and depth clustering patterns.

6.0.2 Evidence for Multi-Reservoir System

Our comprehensive analysis reveals three distinct seismic signatures that strongly support the proposed multi-reservoir magma system:

6.0.2.1 Pre-Eruptive Shallow Swarm Activity

Intense earthquake swarms occurred in the shallow subsurface (< 10 km depth) during the weeks preceding the September 19th eruption onset. This activity correlates with significant surface deformation measurements and indicates shallow magma intrusion processes.

6.0.2.2 Syn- and Post-Eruptive Crustal Reservoir Activity

Following eruption initiation, continuous moderate-magnitude seismicity established at 10-15 km depth, consistent with ongoing magma movement within the proposed shallow crustal reservoir. This persistent activity suggests active magma storage and transport processes.

6.0.2.3 Deep Mantle Reservoir Signatures

High-magnitude seismic events ($M > 4.0$) occurred systematically at 30-40 km depths throughout the study period. These deeper events, while less frequent than shallow activity, demonstrate continuous activity within the proposed deep mantle reservoir system.

Chapter 7

4. Discussion

7.0.1 Validation of Multi-Reservoir Models

The seismic evidence presented strongly validates theoretical multi-reservoir magma storage models previously proposed for Cumbre Vieja. The bimodal depth distribution of earthquakes, with distinct clustering at shallow (10-15 km) and deep (30-40 km) levels, provides compelling observational support for hierarchical magma storage systems.

7.0.2 Implications for Volcanic Hazard Assessment

Understanding magma reservoir architecture has direct implications for eruption forecasting:

- **Deep reservoir monitoring:** High-magnitude events at mantle depths may serve as long-term eruption precursors
- **Shallow reservoir dynamics:** Swarm activity in the crustal reservoir provides short-term eruption warnings
- **System connectivity:** Temporal relationships between deep and shallow activity indicate reservoir interaction

7.0.3 Methodological Advances

This study demonstrates the effectiveness of systematic seismic catalog analysis for validating geophysical models. The integration of spatial, temporal, and magnitude characteristics provides a robust framework for magma system characterization.

Chapter 8

5. Conclusions

Analysis of 5,465 seismic events from the 2021 La Palma eruption provides unprecedented insight into active volcanic processes:

Chapter 9

Key Findings

1. **Multi-reservoir validation:** Clear evidence supports two-level magma storage system
2. **Depth stratification:** Distinct seismic signatures at mantle (30-40 km) and crustal (10-15 km) depths
3. **Temporal relationships:** Systematic progression from deep to shallow activity preceding eruption
4. **Monitoring implications:** Seismic patterns offer robust indicators for eruption forecasting

Chapter 10

Future Directions

- Integration with additional geophysical datasets (deformation, gas emissions)
- Development of real-time monitoring algorithms
- Comparative analysis with other volcanic systems
- Enhancement of probabilistic eruption forecasting models

Chapter 11

Data Availability Statement

Seismic data were obtained from the Instituto Geográfico Nacional (IGN) public database. Data processing scripts, analysis notebooks, and visualization tools have been developed to ensure reproducibility and are available through institutional repositories. All methodological approaches follow open science principles to facilitate community validation and extension.

Chapter 12

Evaluating Phase Retrieval STEM Techniques

Information Transfer Analysis in Advanced Electron Microscopy

Chapter 13

Abstract

This comprehensive study evaluates advanced methods for phase retrieval in Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM), providing systematic analysis of information transfer capabilities across multiple techniques. We examine center-of-mass imaging, tilt-corrected bright-field STEM, and direct ptychographic methods through rigorous Contrast Transfer Function (CTF) and Spectral Signal-to-Noise Ratio (SSNR) analysis. Our evaluation demonstrates that direct ptychographic methods achieve superior high-frequency performance and uniform information transfer, while center-of-mass techniques excel at low spatial frequencies. These findings provide essential guidance for method selection and experimental optimization in high-resolution electron microscopy applications.

Chapter 14

1. Introduction

Phase retrieval in electron microscopy has emerged as a transformative approach for achieving atomic-resolution imaging with enhanced contrast and quantitative information. The fundamental challenge lies in recovering phase information lost during the detection process, where only intensity measurements are typically available. STEM techniques offer unique advantages for phase retrieval applications due to their focused probe geometry, flexible detector configurations, and ability to collect comprehensive diffraction data.

Recent advances in computational algorithms and detector technology have enabled sophisticated phase retrieval methods that can extract quantitative structural information with unprecedented precision. This technological convergence has made STEM-based phase retrieval essential for applications ranging from materials characterization to biological imaging.

14.1 Historical Context and Current Challenges

The development of phase retrieval methods in STEM has evolved through several generations of techniques, each addressing specific limitations while introducing new capabilities. Traditional approaches relied on computational post-processing, while modern methods integrate real-time reconstruction algorithms with optimized experimental protocols.

Chapter 15

2. Phase Retrieval Methods in STEM

15.1 Theoretical Framework

Our comprehensive evaluation encompasses three primary methodological approaches, each offering distinct advantages for specific experimental conditions and applications.

15.1.1 Center-of-Mass Imaging

Center-of-mass (COM) imaging represents a computationally efficient approach that utilizes systematic deflection measurements of the electron beam to reconstruct phase information. The fundamental principle relies on measuring the shift in the diffraction pattern centroid, which directly correlates with local electric fields within the specimen.

Key advantages: - Real-time processing capabilities - Minimal computational requirements - Robust performance at low spatial frequencies

15.1.2 Tilt-Corrected Bright-Field STEM

This sophisticated technique addresses aberration-related artifacts by analyzing intensity variations in bright-field STEM images acquired across multiple tilt conditions. The method employs advanced algorithms to separate aberration contributions from genuine specimen-related phase information.

Technical specifications: - Multi-angle acquisition protocols - Advanced aberration correction algorithms
- Optimized for routine high-throughput applications

15.1.3 Direct Ptychographic Methods

Direct ptychography represents the most computationally intensive but potentially most powerful approach, reconstructing both object and probe functions simultaneously from overlapping diffraction patterns. This method offers superior resolution and phase sensitivity through iterative optimization algorithms.

Performance characteristics: - Highest achievable spatial resolution - Quantitative phase reconstruction
- Optimal for research applications requiring maximum information content

Chapter 16

3. Methods and Analysis Framework

16.0.1 Experimental Design and Data Collection

Our systematic evaluation employed standardized experimental protocols to ensure meaningful comparisons across all three phase retrieval methods. Data collection encompassed multiple specimen types and experimental conditions to assess method robustness and versatility.

16.0.2 Analytical Framework

We developed a comprehensive quantitative framework to evaluate the information transfer capabilities of each technique through multiple complementary approaches:

- **Contrast Transfer Function (CTF)** analysis for spatial frequency characterization
- **Spectral Signal-to-Noise Ratio (SSNR)** calculations for noise performance assessment
- **Phase reconstruction fidelity** metrics for accuracy evaluation
- **Computational efficiency** benchmarking for practical implementation assessment

16.0.3 Performance Metrics and Evaluation Criteria

16.0.3.1 Contrast Transfer Function (CTF)

The CTF describes how different spatial frequencies are transferred from the object to the image:

$$CTF(k) = \sin(\chi(k))$$

where $\chi(k)$ is the aberration function.

16.0.3.2 Spectral Signal-to-Noise Ratio (SSNR)

SSNR quantifies the quality of phase information transfer:

$$SSNR(k) = \frac{|F_{signal}(k)|^2}{|F_{noise}(k)|^2}$$

Chapter 17

4. Results and Analysis

17.0.1 Comprehensive Performance Assessment

Our systematic evaluation across multiple experimental conditions and specimen types provides definitive guidance for method selection and optimization strategies.

17.0.2 Contrast Transfer Function Analysis

CTF analysis reveals fundamental differences in spatial frequency response across the three methods:

Direct Ptychographic methods demonstrate the most uniform information transfer across all spatial frequencies, with consistent performance from low-frequency structural information to high-frequency atomic details. This uniformity represents a significant advantage for quantitative analysis applications.

Center-of-mass imaging exhibits optimal performance at low to moderate spatial frequencies, making it ideal for applications requiring rapid structural characterization without atomic-level detail.

Tilt-corrected bright-field STEM provides intermediate performance with excellent stability across moderate spatial frequencies, offering the optimal balance for routine analytical applications.

17.0.3 Signal-to-Noise Ratio Analysis

SSNR calculations provide critical insights into practical performance under realistic experimental conditions:

1. **Center-of-mass imaging:** Exceptional performance at low spatial frequencies with minimal noise amplification
2. **Tilt-corrected bright-field STEM:** Balanced performance across all frequencies with robust noise handling
3. **Direct Ptychographic methods:** Superior high-frequency performance with advanced noise management algorithms

17.0.4 Experimental Parameter Sensitivity

Critical factors affecting performance across all methods include:

- **Scan sampling effects:** Systematic correlation between sampling density and reconstruction quality
- **Aberration sensitivity:** Direct methods demonstrate superior robustness to optical aberrations
- **Detector geometry optimization:** Performance critically dependent on detector configuration for all techniques
- **Computational resource requirements:** Significant variation in processing demands across methods

Chapter 18

5. Discussion

18.0.1 Methodological Advances and Implications

Our comprehensive evaluation provides unprecedented insights into the relative performance characteristics of phase retrieval methods in STEM applications, establishing a quantitative framework for method selection and optimization.

18.0.2 Advantages of Multi-Metric Analysis

The integration of CTF and SSNR analysis provides superior evaluation capabilities compared to traditional single-metric approaches:

- **Comprehensive noise characterization:** Accounts for realistic experimental noise conditions
- **Frequency-dependent performance assessment:** Enables targeted optimization for specific applications
- **Quantitative comparison framework:** Facilitates objective method selection based on performance requirements
- **Experimental condition integration:** Incorporates real-world constraints and limitations

18.0.3 Practical Implementation Guidelines

18.0.3.1 Method Selection Strategy

For routine analytical applications: Center-of-mass techniques provide optimal balance of speed, simplicity, and adequate resolution for most structural characterization tasks.

For advanced research applications: Direct ptychographic methods offer superior performance for applications requiring maximum spatial resolution and quantitative phase information.

For high-throughput screening: Tilt-corrected bright-field STEM provides optimal compromise between information content and processing efficiency.

18.0.3.2 Experimental Optimization Framework

Achieving optimal performance across all methods requires systematic consideration of multiple interdependent factors:

- **Probe optimization:** Aberration correction and beam conditions tailored to specific method requirements
- **Detector configuration:** Geometry and sensitivity optimized for target spatial frequency range

- **Acquisition parameters:** Scan sampling and integration time balanced against noise and drift considerations
- **Computational infrastructure:** Processing capabilities matched to method complexity and throughput requirements

Chapter 19

6. Conclusions

Analysis of phase retrieval methods in STEM applications provides definitive guidance for technique selection and experimental optimization:

Key Findings

1. **Direct ptychographic methods:** Deliver superior high-frequency performance and uniform information transfer across all spatial frequencies, making them optimal for research applications requiring maximum spatial resolution
2. **Multi-metric analysis framework:** CTF and SSNR evaluation provides comprehensive assessment capabilities exceeding traditional single-metric approaches
3. **Method-specific optimization:** Each technique requires tailored experimental protocols and computational resources for optimal performance
4. **Application-driven selection:** Method choice should prioritize specific experimental requirements over theoretical capabilities

19.0.1 Future Directions and Research Opportunities

Methodological development: Integration of hybrid approaches combining computational efficiency of center-of-mass methods with resolution capabilities of direct ptychography represents a promising research direction.

Real-time optimization: Development of adaptive algorithms for automatic parameter optimization during data acquisition could significantly improve practical implementation across all methods.

Machine learning integration: Application of advanced machine learning techniques for noise reduction and reconstruction optimization offers potential for substantial performance improvements.

Standardization efforts: Establishment of community-wide benchmarking protocols would facilitate method comparison and accelerate technique development.

19.1 Data Availability Statement

Experimental protocols, analysis algorithms, and benchmark datasets have been developed following open science principles to facilitate community validation and method comparison. All computational tools and data processing workflows are available through institutional repositories with comprehensive documentation for reproducible implementation.

19.2 Acknowledgments

We acknowledge the computational resources provided by advanced microscopy facilities and the valuable scientific discussions with the international electron microscopy community that informed this comprehensive analysis. Special recognition is extended to the instrument developers and algorithm designers whose innovations enabled this comparative evaluation.

Chapter 20

3. Evaluación multitemporal de la resiliencia comunitaria ante eventos tecnológicos

Análisis del desastre de Dosquebradas 2011-2021

Chapter 21

Resumen

La resiliencia comunitaria es la capacidad de una población a enfrentar, responder y adaptarse a emergencias y desastres manteniendo su estructura básica, función e identidad. Sin embargo, la resiliencia comunitaria ante eventos tecnológicos ha sido escasamente estudiada en Colombia. Aquí se mide y evalúa la resiliencia comunitaria ante desastres empleando la aplicación de la herramienta ARC-D en una población del municipio de Dosquebradas (barrio Villa Carola) dónde en 2011 ocurrió un proceso de remoción en masa que desencadenó un derrame de hidrocarburos generando la pérdida de 33 vidas debido a una explosión y desbordando las capacidades de respuesta del municipio. Seguimos una metodología con enfoque cualitativo para la interacción comunidad-territorio y una con enfoque cuantitativo para el procesamiento de datos. Para la discusión comunitaria se empleó un instrumento tipo encuesta medida por grupo focal con facilitador, en la que se evaluaron cuatro áreas temáticas. La aplicación de la herramienta tuvo un diagnóstico de resiliencia previo y una prueba piloto de ajuste al grupo focal. Encontramos un nivel bajo de resiliencia para el año (2011) con un mayor énfasis en la baja comprensión del riesgo, contrario al componente más alto que corresponde a cohesión social en el territorio. El año (2021) registró un nivel de mediana resiliencia con mejores resultados en el fortalecimiento de la gobernanza para gestionar el riesgo de desastres, reflejado en su componente destacado, que fue la participación de las mujeres. Concluimos que en la Comuna 10 de Dosquebradas mejoró sus capacidades de resiliencia comunitaria ante desastres por riesgo tecnológico de 30,08% a 60,18%, destacando el aumento de la participación comunitaria, la organización social y la apropiación de la cultura de la prevención del riesgo. Se recomienda a los entes territoriales y locales conocer la percepción del riesgo de las comunidades para enfocar adecuadamente sus políticas, estrategias e instrumentos en la toma de decisiones.

Palabras clave: Resiliencia comunitaria ante desastres, riesgo tecnológico, herramienta ARC-D, gestión del riesgo de desastres, análisis multitemporal de resiliencia, percepción del riesgo.

Chapter 22

1. Introducción

La resiliencia comunitaria es la capacidad de las comunidades y hogares que viven dentro de sistemas complejos para anticiparse y adaptarse a los riesgos, para absorber, responder y recuperarse de las amenazas y estresores de una manera oportuna y efectiva sin comprometer sus posibilidades a largo plazo, mejorando finalmente su bienestar [4]. Esta definición sigue la del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores mundiales para las metas mundiales del Marco de Sendai que define la resiliencia como “la capacidad que tiene un sistema, una comunidad o una sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse, transformarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficiente, en particular mediante la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas por conducto de la gestión de riesgos” [3]. Otras aproximaciones definen la resiliencia comunitaria como la capacidad de los sistemas para hacer frente y adaptarse a eventos extremos, sin perder su estructura básica, y hace énfasis en que la cultura de la resiliencia permite reducir pérdidas humanas, socioeconómicas y ambientales [2]

La resiliencia comunitaria tiene dos componentes. Primero, la capacidad de adaptación, que se define como las condiciones que permiten a las personas y/o comunidades anticipar y responder al cambio, minimizar las consecuencias, recuperarse y aprovechar las nuevas oportunidades [12]. Segundo, la percepción del riesgo, en el cual las comunidades perciben el riesgo basado en procesos cognitivos influidos por diversos factores, tales como las características y la gravedad del riesgo, experiencias previas, la cantidad y calidad de la información disponible, así como los valores individuales y sociales y el conocimiento sobre el fenómeno que genera el riesgo [14].

La importancia de considerar la percepción del riesgo de desastres como una necesidad reciente, especialmente en el contexto del cambio climático y el incremento de desastres, ha sido abordado en análisis de percepción del riesgo, a partir de métodos psicosociales sustentados en la subjetividad de los seres humanos ante los escenarios de riesgo presentes en sus entornos [15]. Sin embargo, los enfoques se han direccionado a eventos de tipo natural y socio-natural dejando a un lado los escenarios de riesgo antrópico-tecnológicos. Los riesgos tecnológicos en Sudamérica han sido poco explorados a partir de ejercicios de percepción del riesgo que permitan establecer niveles de resiliencia comunitaria ante este tipo de eventos.

Los autores Sandoval, Navarrete, & Cuadra [14] resaltan que la resiliencia comunitaria se ha estudiado en Latinoamérica principalmente en países como Chile, seguido de Puerto Rico y Brasil. Los principales riesgos estudiados son terremotos (12), inundaciones (11) y tsunamis (7), y los escasamente estudiados son sequías, erupciones volcánicas y eventos extremos vinculados al cambio climático [13]. Los autores afirman que en Latinoamérica una de las principales barreras para el desarrollo o despliegue de la resiliencia comunitaria, son las condiciones de vulnerabilidad en las dimensiones políticas, sociales, económicas y ambientales. Frente a este panorama, en Colombia la resiliencia comunitaria ha sido escasamente estudiada y los trabajos realizados se han enfocado en análisis comparativos a partir de índices compuestos de resiliencia para dimensiones ecosistémicas. Estos trabajos han utilizado variables como diversidad de suelos, diversidad de empresas, índice de desempeño integral y capacidad de carga sobre el ecosistema, arrojando como resultados gran disparidad entre los niveles de resiliencia de los entes territoriales estudiados [17].

Aquí presentamos la evaluación de la resiliencia comunitaria multitemporal entre los años 2011 y 2021 el

municipio de Dosquebradas en el barrio Villa Carola, dónde en 2011 ocurrió un evento de origen natural que desencadenó un accidente tecnológico o Natech, debido a un proceso de remoción en masa que causó el derrame de hidrocarburos ocasionando 33 muertes debido a una explosión por el hidrocarburo derramado en un punto caliente y desbordando las capacidades de respuesta municipales.

Actualmente, la Comuna 10 donde se ubica el barrio Villa Carola, presenta múltiples amenazas socio-naturales por deslizamientos y amenazas tecnológicas por actividades industriales, transporte de hidrocarburos a partir de infraestructura como poliductos y gasoductos, transporte de sustancias peligrosas a partir de vehículos cisterna, aglomeración de público, entre otras.

Caso de Estudio: Desastre tecnológico en la Comuna 10 de Dosquebradas (2011)

El 23 de diciembre de 2011 ocurrió en la Comuna 10 de Dosquebradas una de las tragedias más graves asociadas a riesgo tecnológico en Colombia. Una fuga de combustible en el poliducto Puerto Salgar–Cartago descendió por la quebrada Aguazul y al entrar en contacto con una fuente de calor, desencadenó una serie de explosiones. El evento afectó principalmente a los barrios Villa Carola, La Divisa, La Romelia en la Comuna 10 del municipio, dejando 33 personas fallecidas, 110 heridas, más de cien viviendas afectadas y 38 destruidas, además de pérdidas en establecimientos comerciales.



Fuente: Archivo Gobernación de Risaralda, 2011.

Las causas se atribuyeron tanto a factores antrópicos, como la presencia de válvulas ilegales en el poliducto, como a factores naturales, en particular la reptación del terreno producto de la ola invernal de 2011, que generó tensiones y la fractura de la tubería. El desastre también impactó ambientalmente la quebrada Aguazul, contaminada con más de 1,400 galones de gasolina que afectaron su ronda hídrica y la bocatoma que abastecía a cerca de 25,000 personas.

La atención inmediata contó con la participación de la comunidad, organismos de socorro, autoridades locales y nacionales, así como la empresa Ecopetrol. Posteriormente, se desarrollaron procesos de diálogo y reparación, que permitieron una recuperación colectiva menos traumática y consolidaron aprendizajes comunitarios sobre la gestión del riesgo. El Desastre presentado en el barrio Villa Carola de Dosquebradas fue documentado en el libro *Huellas de Esperanza*, en el que se narran los eventos ocurridos en diciembre de 2011 y en los meses siguientes después de la tragedia en las etapas de rehabilitación y recuperación postdesastre.

Fuente: adaptado de Ecopetrol S.A., Veeduría Ciudadana & Fundación Social Cooplarosa (2015). Huellas de Esperanza.

Chapter 23

2. Metodología

23.1 Municipio de Dosquebradas y contexto de la Comuna 10

El municipio de Dosquebradas pertenece al departamento de Risaralda en Colombia. Se encuentra en el sector oriental del departamento y se ubica en la parte occidental de la Cordillera Central. Sus límites municipales son al norte y al este con el municipio de Santa Rosa, al sur con la ciudad de Pereira, y al noroeste con el municipio de Marsella. Dosquebradas se compone de su casco urbano con más de trescientos barrios, dos centros poblados y veinticinco veredas. La población es de 217,178 habitantes, distribuidos en 77,387 unidades de vivienda y 64,576 hogares. La proyección poblacional ajustada indica que el 94.6% pertenece a la cabecera municipal, mientras que el 5.4% pertenece a los centros poblados y rurales dispersos. En el mapa de la **Fig-1** se visualiza la localización de la Comuna 10 del municipio de Dosquebradas y la distribución espacial del estado de la comuna frente a escenarios de amenaza o riesgo, tanto de tipo tecnológico como socio-natural, identificados en el territorio. Se observan las amenazas tecnológicas, entre ellas las áreas de aglomeración, las rutas de transporte de carga y los sectores de almacenamiento de carga, en el contexto de la dinámica urbana y social de la comuna. Además, zonas con amenaza por movimientos en masa, red hidrográfica y líneas de tensión eléctrica que atraviesan el área también se diferencian en sectores clasificados como de alto riesgo mitigable y alto riesgo no mitigable por fenómenos recurrentes. Los últimos permiten dar contexto frente a los eventos de tipo Natech que puedan presentarse en la comuna, como los registrados en el evento de la tragedia del año 2011. Se destaca la ausencia del poliducto en la comuna, dado que dicha infraestructura suspendió sus servicios tiempo atrás a la aplicación del presente ejercicio.

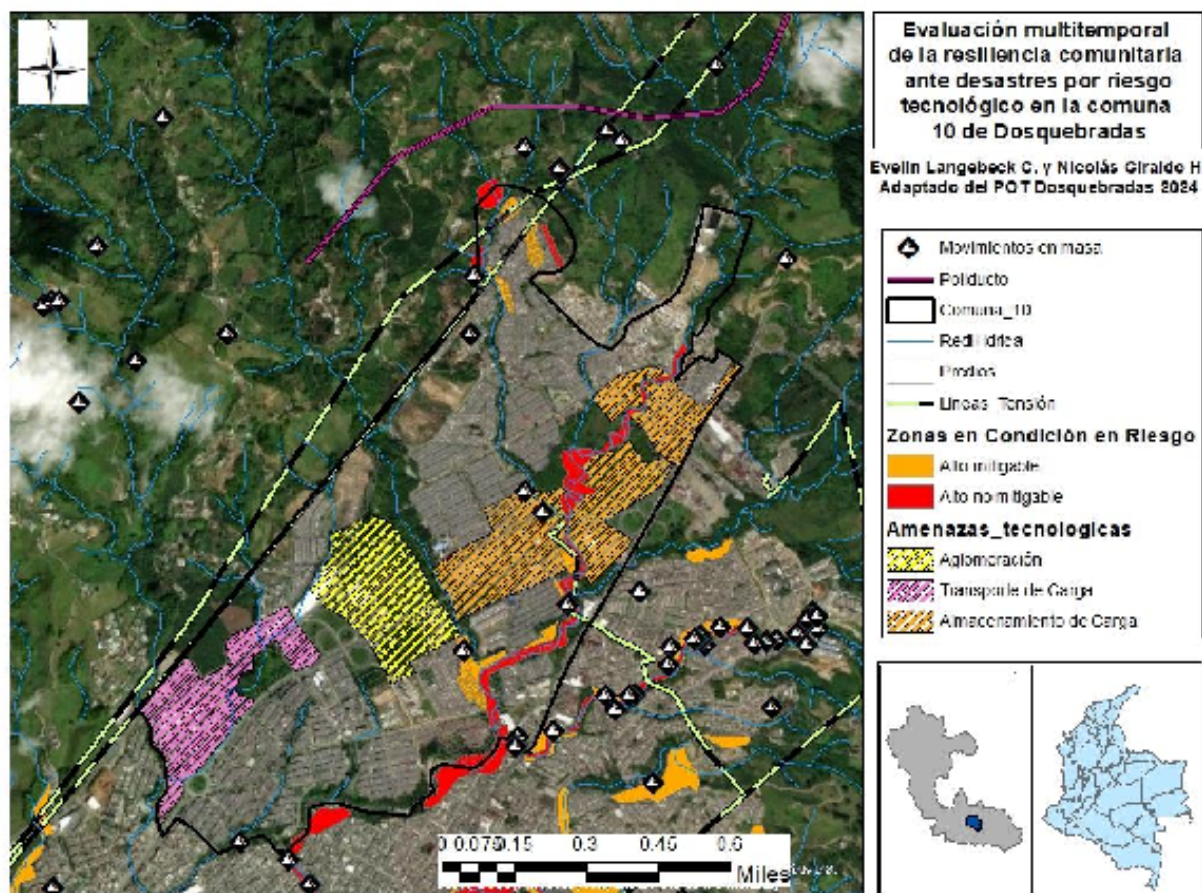


Figura 1. Mapa de localización del municipio de Dosquebradas (fuente: elaboración propia).

23.2 Herramienta ARC-D para evaluación de resiliencia comunitaria

Se utilizó la herramienta ARC-D para medir la resiliencia comunitaria ante desastres desarrollada por la organización GOAL (<https://www.goalglobal.org/>). Esta herramienta tiene un enfoque mixto, con elementos cualitativos y cuantitativos. El enfoque cualitativo hace referencia a la interacción con la comunidad de los territorios, con los cuales se recoge la información desde una perspectiva social y comunitaria, a través de un instrumento tipo encuesta de 30 preguntas (?@fig-2), las cuales cuentan con instrumentos de verificación. El enfoque cuantitativo se refiere al procesamiento de los datos y permite obtener gráficos de red para la sistematización y presentación de la información de tipo numérico y jerárquico. La herramienta cuenta con dos etapas. Una etapa A que realiza un diagnóstico general de la comunidad y una etapa B, que se enfoca en las preguntas de evaluación en el grupo focal (?@fig-2). De acuerdo con GOAL [5], esta herramienta se construye de acuerdo al trabajo en resiliencia ante desastres.

i Etapas de la herramienta ARC-D de GOAL

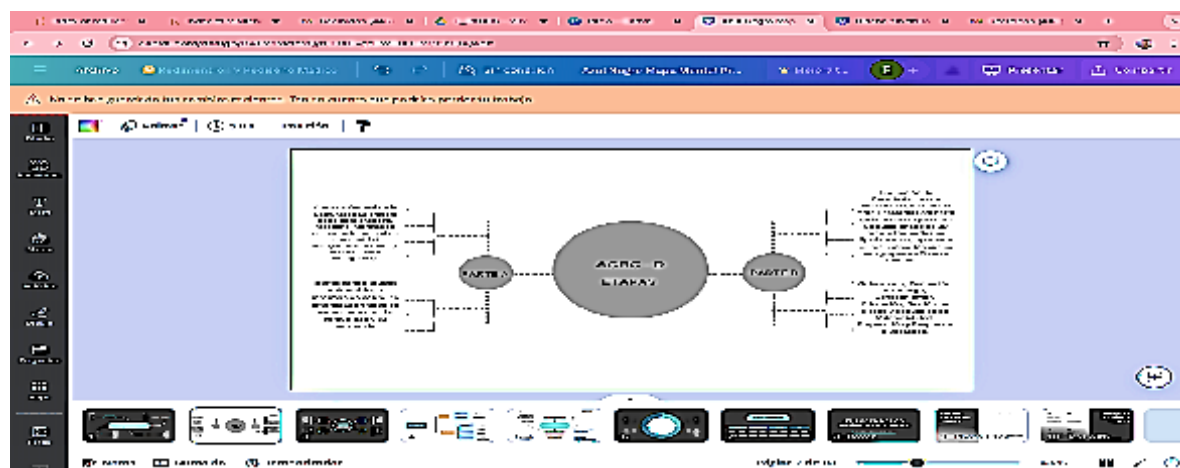


Figura 2. Componentes herramienta ARC-D. La herramienta de evaluación de resiliencia comunitaria establecida por GOAL evalúa cuatro áreas temáticas que conforman 30 componentes. La evaluación produce cinco niveles o categorías que describen condiciones desde mínima hasta alta resiliencia, de acuerdo con la percepción del grupo focal evaluado. (Fuente: Autores).

23.2.1 Categorías de evaluación de la herramienta ARC-D de GOAL

Table 23.1: Categorías de evaluación de la herramienta ARC-D de GOAL

%	Nivel	Categoría	Descripción
0-20	1	Mínima Resiliencia	Poca conciencia del problema o poca motivación para abordarlo. Acciones limitadas a respuestas durante crisis.
21-40	2	Baja Resiliencia	Se tiene conciencia del problema, se cuenta con capacidad para actuar, pero de manera limitada, con intervenciones fragmentadas y a corto plazo
41-60	3	Mediana Resiliencia	Desarrollo e implementación de soluciones. Capacidad de actuar es mejorada y sustancial. Intervenciones numerosas y de largo plazo
61-80	4	Resiliencia	Coherencia e integración. Intervenciones amplias, cubriendo los mayores aspectos del problema y ligadas a una estrategia coherente y de largo plazo.
81-100	5	Alta Resiliencia	Existe una cultura de seguridad en los actores en donde la gestión del riesgo en toda política, planeación, prácticas, actitudes y comportamientos.

23.2.2 Glosario de términos relacionados con la herramienta ARC-D

Capacidad: Es la habilidad de las personas, instituciones y sociedades para llevar a cabo funciones, resolver problemas y fijarse y obtener objetivos. De acuerdo con la UNISDR, es la combinación de todas las fortalezas, atributos y recursos disponibles dentro de una comunidad, sociedad u organización para poder obtener las metas acordadas. La capacidad puede incluir infraestructura y medios físicos, instituciones, habilidades de adaptación de las sociedades, así como conocimiento humano, habilidades y atributos colectivos tales como las relaciones sociales, liderazgo, y administración. La evaluación de capacidades es un término para el proceso mediante el cual la capacidad de un grupo es revisada contra sus metas deseadas, y las brechas de capacidad son identificadas para acciones futuras.

Estresores: Los estresores son tendencias a largo plazo que socavan el potencial de un sistema o proceso y que aumentan la vulnerabilidad de los actores dentro de ella. Estos pueden ser degradación de los recursos naturales, pérdida en la producción agrícola, urbanización, cambios demográficos, cambio climático, inestabilidad política y reducción en los ingresos.

Gobernanza: La gobernanza es el proceso de toma de decisiones y la subsecuente implementación (o no implementación) de esas decisiones. Es el ejercicio de la autoridad política, económica y administrativa en el manejo de los asuntos de un país en todos los niveles. Se compone de mecanismos, procesos e instituciones a través de los cuales los ciudadanos y grupos articulan sus intereses, ejercen sus derechos legales, cumplen sus obligaciones y median sus diferencias. La gobernanza abarca, pero también trasciende el estado. Abarca a todos los grupos relevantes incluyendo al sector privado y organizaciones de la sociedad civil.

23.2.3 Componentes evaluativos del ARC-D

La herramienta ARC-D estructura la resiliencia comunitaria en cuatro áreas temáticas que responden a los objetivos del marco de Sendai, que permiten analizar de manera amplia las capacidades de una comunidad frente a situaciones de desastre.

La primera área temática corresponde a comprender el riesgo de desastres, la cual busca identificar en qué medida la comunidad reconoce y se apropia del conocimiento sobre sus amenazas, así como de las estrategias de sensibilización y educación. Se agrupa en cuatro componentes: evaluación participativa y evaluación científica del riesgo, la difusión de información y la educación de los niños en reducción de riesgo. La segunda área temática se orienta a fortalecer la gobernanza para gestionar el riesgo de desastres y reúne siete componentes. En este caso, los componentes que se abordan son los mecanismos de planificación del desarrollo y planificación territorial, la toma de decisiones colectivas, la inclusión de grupos vulnerables y de mujeres, el conocimiento de derechos, así como las alianzas para la reducción de riesgo y los procesos de recuperación.

La tercera área temática corresponde a reducir la vulnerabilidad a desastres para mejorar la resiliencia que contempla doce componentes: la gestión ambiental sostenible, la seguridad y gestión del agua, el acceso y conciencia de la salud, el suministro seguro de alimentos, las prácticas de medios de vida resistentes a amenazas, el acceso a mercado, el acceso a servicios financieros, la protección de ingresos y activos, el acceso a protección social, la cohesión social y prevención de conflictos, la infraestructura crítica y la vivienda.

Finalmente, la cuarta área temática se dedica a mejorar la preparación ante desastres para lograr respuestas efectivas y promover la reconstrucción resiliente después de una emergencia y se conforma por siete componentes que abarcan: la planificación de contingencia y recuperación, los sistemas de alerta temprana, la capacidad de preparación y respuesta, los servicios de salud y educación durante emergencias, la infraestructura en contextos de crisis y el liderazgo comunitario en la respuesta y la recuperación.

Los componentes de las áreas temáticas de la evaluación de resiliencia comunitaria se evalúan según los parámetros de resiliencia establecidos por GOAL. A continuación se presentan los términos relacionados con el riesgo tecnológico, los cuales se mencionan en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres en su componente programático.

i Glosario de términos relacionados con el riesgo tecnológico

Accidente tecnológico: eventos generados por el uso y acceso a la tecnología, originados por eventos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación. Comprende fugas, derrames, incendios y explosiones asociados a la liberación súbita de sustancias y/o energías con características de peligrosidad. Usualmente, se suelen asociar los accidentes tecnológicos exclusivamente con las instalaciones industriales o equipamientos de alta tecnología. No obstante, la experiencia de accidentabilidad deja entrever muchos eventos en el sector residencial y a nivel de obras civiles.

Amenaza tecnológica: Amenaza relacionada con accidentes tecnológicos o industriales, procedimientos peligrosos, fallos de infraestructura o de ciertas actividades humanas, que pueden causar muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. Algunas veces llamadas amenazas antropogénicas. Ejemplos incluyen contaminación industrial, descargas nucleares y radioactividad, desechos tóxicos, ruptura de presas, explosiones e incendios.

Riesgo tecnológico: Daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos generados por el uso y acceso a la tecnología, originados en sucesos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación.

Chapter 24

3. Recolección y Procesamiento de Datos

24.1 Reconocimiento de la Comuna 10 y sus líderes

La fase exploratoria consistió en actividades encaminadas a la revisión de información bibliográfica de artículos, publicaciones y metodologías relacionadas con resiliencia comunitaria, riesgo tecnológico, percepción del riesgo e instrumentos de planificación de gestión del riesgo de orden local. La revisión de la herramienta ARC-D con sus componentes y glosario (**Caja 2**) y la participación en capacitaciones virtuales sobre la herramienta dirigidas por GOAL sede Nicaragua.

Previo a la aplicación de la herramienta, se realizó el acercamiento al territorio y la comunidad mediante una visita de campo, tres reuniones preliminares virtuales y una reunión presencial con los líderes comunitarios para socializar el objetivo de la aplicación de la herramienta ARC-D, de donde surgieron propuestas de la comunidad, orientadas a la aplicación del grupo focal, correspondiente a la evaluación de los 30 componentes del ARC-D. Igualmente, se efectuó una prueba piloto que permitió ajustar la herramienta de manera conceptual y metodológica, generando adaptaciones a los formatos de aplicación y a una mejor contextualización del ejercicio, lo que facilitó su aplicación final con los líderes de la Comuna 10. Aunque la comunidad ya tenía conocimientos sobre los escenarios de amenaza y riesgo de su comuna, se acordó construir una línea base previa sobre la terminología a utilizar antes de aplicar la herramienta.

El riesgo considerado en la Comuna 10 fue ante eventos tecnológicos, dados los antecedentes de la explosión de Villa Carola en el año 2011 y la presencia de zonas potenciales de riesgo tecnológico en varias zonas de la comuna. Esto, a su vez, permitió establecer el criterio de multitemporalidad en la medición de la resiliencia comunitaria, algo innovador en la aplicación del ARC-D.

24.2 Aplicación de la herramienta ARC-D en el grupo focal

Durante octubre de 2021, se llevó a cabo en el barrio Villa Carola del municipio de Dosquebradas la sesión de grupo focal con 14 líderes comunitarios de diferentes barrios de la Comuna 10, en donde se evaluaron los 30 componentes de la herramienta ARC-D.

El desarrollo de la actividad consistió en la evaluación por la comunidad de la percepción de riesgo frente a escenarios de riesgo de tipo tecnológico, entendiendo los antecedentes de emergencias y desastres ocurridos en la C por este tipo de eventos, específicamente el evento del año 2011. Con base en lo anterior, y dado que la comunidad había presenciado el evento de 2011, así como la etapa de rehabilitación y reconstrucción del barrio Villa Carola, como testigos directos e indirectos de los procesos institucionales y comunitarios que se dieron, se propuso a los asistentes que la evaluación de la aplicación de la herramienta ARC-D se dividiera en dos momentos. El primer momento era la evaluación en retrospectiva de cómo se percibían los componentes evaluados del 2011 hacia atrás, y un segundo momento, en el que se evaluara la percepción

actual de riesgo (año 2021) considerando los mismos 30 componentes del ARC-D frente a eventos tecnológicos. De esta manera se evaluaría la multitemporalidad de la percepción del riesgo y se identificarían las capacidades de resiliencia comunitaria frente a escenarios de tipo tecnológico materializados en la comunidad.



Figura 3. Aplicación de la herramienta ARC-D con grupo focal, líderes de la Comuna 10 el 09 de octubre de 2021 (Fuente: Autores).

2.3 Análisis de datos

Se analizó la información obtenida en campo y en el grupo focal, la cual consistió en las siguientes actividades. La primera parte consiste en el análisis de las encuestas, el cual se realizó mediante el procesamiento de la información en el software CommCare®, donde se registraron los datos y posteriormente se integraron a la plataforma de GOAL. El diligenciamiento de la información permitió obtener el registro de la Comuna 10 en la plataforma Nexus, donde la información fue representada a través de gráficos de red que pueden consultarse en la página web de GOAL Resilience Nexus (https://resiliencenexus.org/es/global_scores/all-scores/) en el radar de resiliencia, seleccionando la siguiente ruta donde se encuentran la evaluación 1 y 2, correspondientes al año 2011 y 2021 respectivamente (ruta: Colombia > Risaralda > Comuna 10 > 1 o 2 (según evaluación que desee consultar).

Se consideró el análisis de entrevistas previas, y se examinó la información cualitativa aportada por los participantes, lo que permitió contextualizar los resultados de las encuestas y profundizar en las percepciones de la comunidad sobre los diferentes componentes de la resiliencia, útiles en el análisis y comprensión de la comunidad frente a los riesgos tecnológicos presentados en su localidad.

Posteriormente, se realizó el análisis comparativo de resultados de la evaluación, considerando cada componente de la herramienta y estableciendo un contraste temporal entre los años 2011 antes de la explosión (año del evento de la explosión en Villa Carola) y 2021 después de la explosión y de los procesos de recuperación y reconstrucción (año de aplicación de la herramienta ARC-D), con el fin de identificar los cambios, las mejoras y los aspectos que requieren mayor intervención en las capacidades de resiliencia de la comunidad frente a eventos tecnológicos.

Finalmente, se emitió la calificación de la resiliencia comunitaria basada en la aplicación de la herramienta ARC-D con enfoque multitemporal en eventos de tipo tecnológico, y se elaboró una propuesta de estrategias orientadas a mejorar las condiciones de resiliencia de la Comuna 10 en el municipio de Dosquebradas.

Proceso metodológico para la evaluación de la resiliencia comunitaria				
Acción	Actividad	Producto o resultado esperado	Participantes	Medio
Reconocimiento de la Comuna 10 y sus líderes	Capacitación con GOAL para la aplicación de la herramienta ARC - D	Entendimiento de la herramienta para la medición de resiliencia comunitaria	Personal de GOAL	Virtual
	Acercamiento con líderes de la Comuna 10 del municipio de Dosquebradas	Contextualización del territorio y de los estresores presentados en la Comuna 10	Líderes comunitarios de gestión del riesgo de Dosquebradas	Presencial
	Prueba piloto con grupo focal preliminar	Adaptación de la herramienta ARC - D al contexto comunitario de Dosquebradas frente a eventos de tipo tecnológico	Líderes comunitarios de la Comuna 10 de Dosquebradas	Mixto
Aplicación de la herramienta ARC - D en el grupo focal	Evaluación de resiliencia comunitaria frente a eventos tecnológicos en el contexto temporal del año 2011 (Antes de la explosión).	Resultados de percepción del riesgo ante eventos tecnológicos para la medición de resiliencia comunitaria después de la explosión - Temporalidad 2021.	Grupo focal con los líderes comunitarios de la Comuna 10 de Dosquebradas	Presencial
	Evaluación de resiliencia comunitaria frente a eventos tecnológicos en el contexto temporal del año 2021 (Después de la explosión).	Resultados de percepción del riesgo ante eventos tecnológicos para la medición de resiliencia comunitaria antes de la explosión - Temporalidad 2011.	Grupo focal con los líderes comunitarios de la Comuna 10 de Dosquebradas	Presencial
Análisis de datos y resultados	Procesamiento de información en CommCare	Registro de las evaluaciones de la Comuna 10 de Dosquebradas en la plataforma Nexus Resilience de GOAL.	Plataforma CommCare	Virtual

Proceso metodológico para la evaluación de la resiliencia comunitaria	Análisis de entrevistas previas	Contextualización de los resultados obtenidos en la aplicación de ARC - D.	Autores	-
	Análisis multitemporal de las evaluaciones del ARC - D	Comparativo de los resultados de percepción comunitaria frente a eventos tecnológicos antes y después de la explosión de Villa Carola en la Comuna 10	Autores	-
	Resultados de la aplicación de la herramienta	Propuesta de estrategias orientadas a mejorar las condiciones de resiliencia comunitaria de la comuna 10 de Dosquebradas	Autores	-

2.4 Desarrollo de la aplicación de la herramienta ARC-D en el grupo focal

Para iniciar la actividad, se realizó una introducción con los líderes comunitarios de la Comuna 10, Diego Buitrago y Elmer Castañeda, quienes realizaron la presentación al espacio y socializaron el objetivo de la sesión. Paralelamente, se realizó una contextualización, donde se explicó el alcance y el contexto de resiliencia comunitaria y el escenario de riesgo tecnológico. En la **Fig-4** se presenta el registro fotográfico de la introducción.



Figura 4. Introducción al grupo focal el sábado 09 de octubre de 2021 (Fuente: Autores).

Evaluación. Se organizó el grupo focal y, con una asistencia de 14 personas (5 hombres y 9 mujeres), se reconocieron como líderes y lideresas de la Comuna 10. Las personas se escogieron por su conocimiento del territorio, su trabajo con las comunidades y su experiencia en el desastre del año 2011, por lo que su información es contundente y especializada para dicha evaluación. Se pactaron acuerdos para desarrollar la sesión y se explicó que la calificación es multitemporal, con un contexto de referencia del año 2011 y otro para las condiciones del año 2021. Con estas claridades se realizó la evaluación de la resiliencia comunitaria ante desastres en la Comuna 10. En la **Fig-5** se evidencia el registro fotográfico de los participantes.

Cierre. Se realizó un balance de la metodología aplicada y se indagó en la percepción que se tuvo del ejercicio. Se manifestó que es relevante la evaluación diez años después del desastre, pues permite evaluar sus capacidades a lo largo del tiempo. A su vez, se analizaron de forma retrospectiva aspectos que han mejorado en términos de capacidades comunitarias y otros en los que se requiere un mayor esfuerzo. Finaliza la sesión con palabras de las comunidades y la propuesta de seguir generando estos espacios por parte de la academia.



Figura 5. Cierre del grupo focal Comuna 10 el 9 de octubre de 2021 (Fuente: Autores).

24.3 Caracterización del riesgo tecnológico en el municipio de Dosquebradas

La caracterización de riesgos tecnológicos en el municipio de Dosquebradas se identifican sectorialmente en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio (2023) por comunas de la siguiente manera (Table ??). Esta caracterización se basa en la información disponible en los instrumentos de planificación del municipio de Dosquebradas.

Table 24.2: Riesgos tecnológicos asociados por comuna para el municipio de Dosquebradas

Comuna o Corregimiento	Riesgo tecnológico asociado
Comuna 10 (Villa Carola)	Estaciones de servicio, estación de reabastecimiento de energía con entradas y salidas de alta tensión, sector industrial, circulación de hidrocarburos y derivados (Actualmente la línea adscrita a TGI y antiguamente la línea adscrita a Ecopetrol y con un evento significativo en materia de riesgos tecnológicos).
Alto del Nudo	Antiguamente la red Puerto Salgar-Cartago adscrita a Ecopetrol. Tuberías de conducción. Sector industrial, comercial y particulares.

24.4 Condiciones de resiliencia comunitaria ante desastres por riesgo tecnológico

Para realizar la evaluación de los componentes de la resiliencia en la Comuna 10, se realizaron reuniones preliminares con líderes de la Comuna 10, los cuales generaron retroalimentación a las preguntas de la herramienta. Esta reunión se denomina, según la herramienta ARC-D, “Grupo Focal”. Las condiciones comunitarias de la Comuna 10 de Dosquebradas incluyen barrios, organizaciones comunitarias y características económicas (?@fig-6).

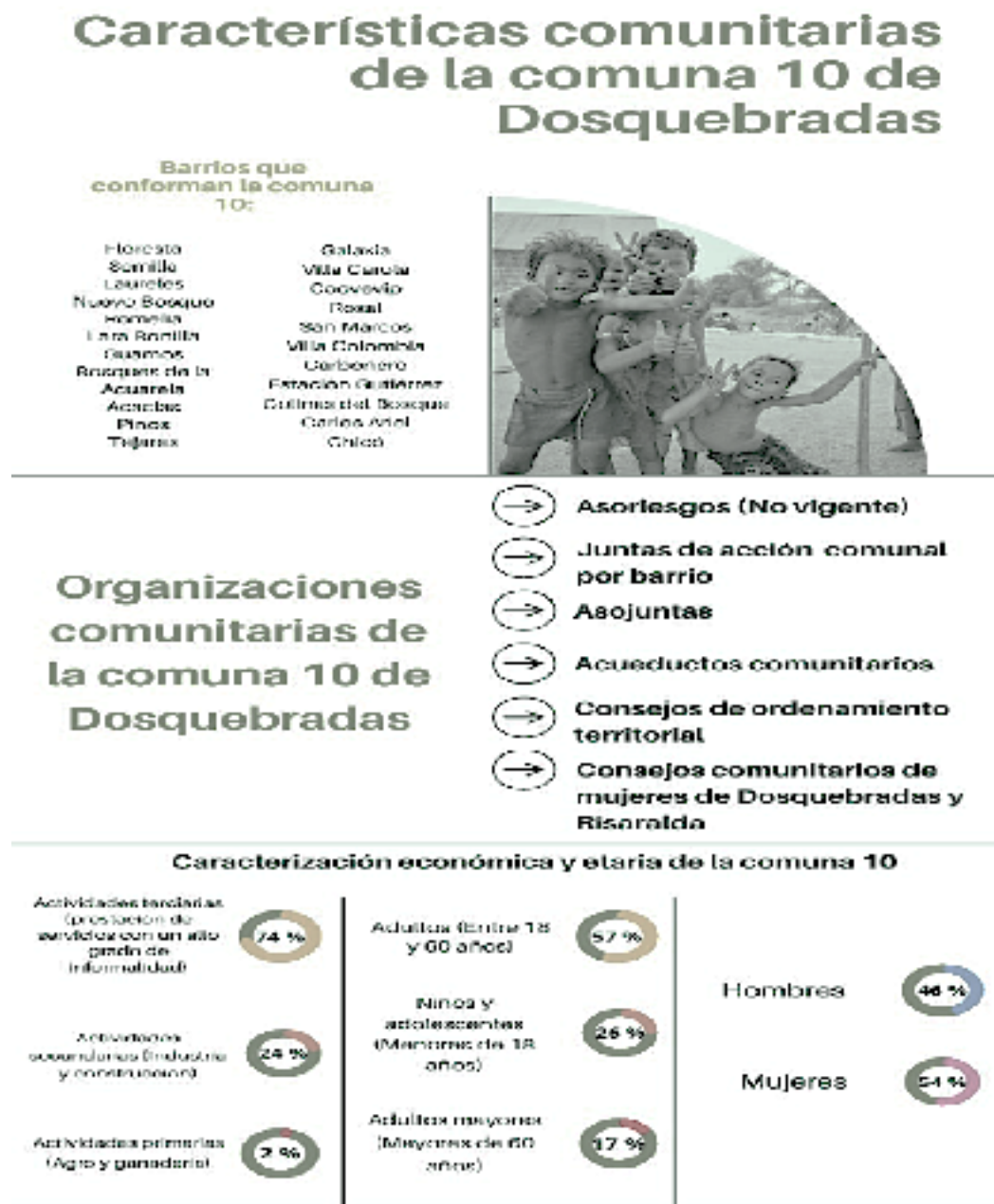


Figura 6. Características comunitarias de la Comuna 10 de Dosquebradas. La conforman los barrios: Carlos Ariel Escobar, La Romelia Alta y Baja, La Divisa, Galaxia, Las Acacias, Los Pinos, Los Guamos, El Bosque Carbonero, La Floresta, Estación Gutiérrez, Villa Carola, Bosques de la Acuarela, Lara Bonilla, El Rosal, El Chicó, Villa Colombia, La Semilla, Tejares de la Loma, Nuevo Bosque.

